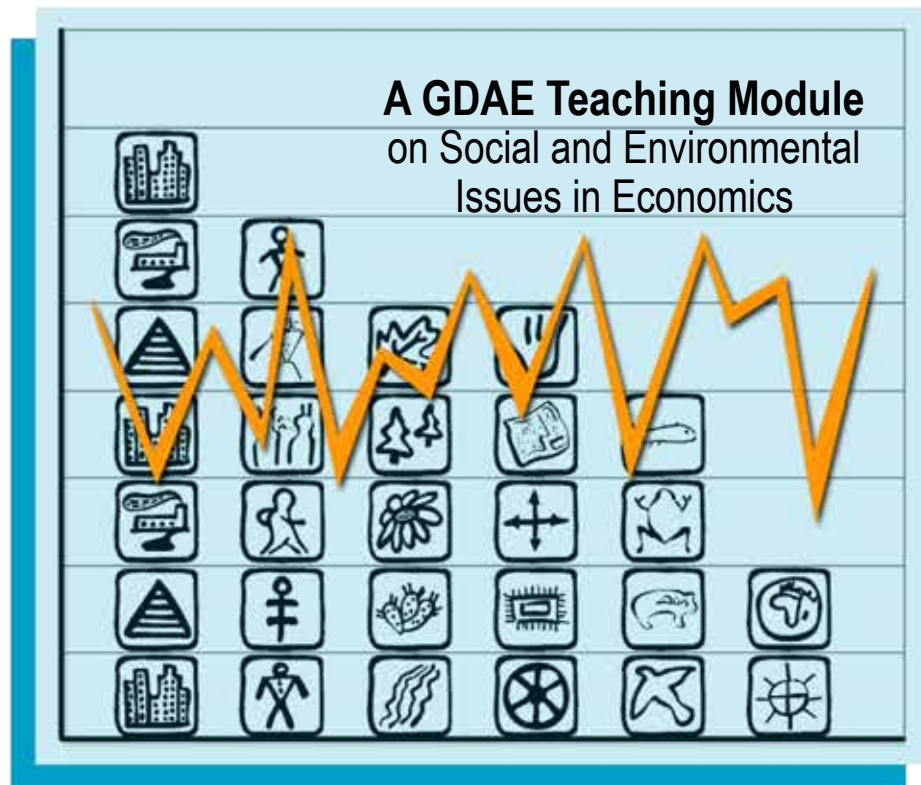


L'Économie du Changement Climatique Mondial

par Jonathan M. Harris, Brian Roach
et Anne-Marie Codur



Global Development And Environment Institute
Tufts University
Medford, MA 02155
<http://ase.tufts.edu/gdae>



VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Copyright © 2017 Global Development And Environment Institute, Tufts University.

Tous droits sont accordés aux enseignants de reproduire ce module à des fins purement académiques. Les étudiants peuvent également télécharger ce module directement à <http://ase.tufts.edu/gdae>.

Les auteurs encouragent tous les usagers de ce module à leur envoyer leurs observations et commentaires.

Global Development And Environment Institute
Tufts University
Medford, MA 02155
<http://ase.tufts.edu/gdae>

E-mail: gdae@tufts.edu

NOTE – les termes écrits en **caractères gras** sont définis dans la section **CONCEPTS ET MOTS CLES** à la fin du module.

L'ECONOMIE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE MONDIAL

Table des matières

1. CAUSES ET CONSEQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	1
Tendances et projections des émissions de dioxyde de carbone au niveau mondial.....	6
Tendances et Projections du Changement Climatique	9
2. L'ANALYSE ECONOMIQUE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	18
Analyses Coût-Bénéfice du Changement Climatique Mondial.....	20
Changement climatique et inégalités	31
3. réponses politiques au changement climatique	35
Adaptation et Mitigation	35
Mesures Préventives de Mitigation du Changement Climatique: les options économiques	39
Les taxes carbone.....	39
Les systèmes de permis transférables et échangeables	45
Taxe carbone ou marché de permis à émettre ?.....	50
Les défis techniques du changement climatique	54
L'Accord de Paris de décembre 2015.....	59
Les contributions promises par les pays sont-elles ou non adéquates ?.....	62
Actions régionales, nationales et locales	65
Des forêts et des sols comme solutions à la crise climatique	68
Conclusion.....	70
CONCEPTS ET MOTS-CLES	72
REFERENCES	76
QUESTIONS	81
EXERCICES	82
SITES WEB	84

L'ECONOMIE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE MONDIAL

1. CAUSES ET CONSEQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les scientifiques ont eu connaissance dès le XIX^{ème} siècle des impacts sur le climat d'une augmentation du dioxyde de carbone (CO₂) et des autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Dans les décennies récentes, la menace du changement climatique mondial est apparue de plus en plus préoccupante. Cette question, que l'on appelle parfois réchauffement climatique, relève en fait d'un changement complexe du climat à l'échelle mondiale, qui se traduit par une augmentation des températures ayant des effets contrastés, un réchauffement dans certaines zones géographiques mais un refroidissement dans d'autres, et d'une manière générale une variabilité climatique accrue, avec des épisodes climatiques extrêmes de plus en plus fréquents.

Des études multiples, revues et vérifiées par des comités d'experts, et présentées dans des publications scientifiques, parviennent à 97% à la même conclusion : depuis un siècle, les changements climatiques intervenus sont, avec une très haute probabilité, le résultat des activités humaines.¹ Les rapports du **Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)** en 2013 et 2014 attribuent clairement la responsabilité des changements climatiques globaux récemment observés aux émissions de gaz à effet de serre produites par l'activité humaine. Les projections du GIEC prévoient des accroissements de température moyenne compris entre 1.5°C et 4.8°C à l'horizon 2100, par rapport aux niveaux de la période préindustrielle (voir encadré 1).²

Le GIEC concluait en 2013 que :

« L'influence humaine a été détectée dans le réchauffement de l'atmosphère et des océans, dans les changements du cycle de l'eau à l'échelle planétaire, dans la réduction des précipitations de neige, dans la diminution des glaciers, dans l'élévation du niveau des mers, et dans la fréquence accrue d'événements climatiques extrêmes. Toutes les données pointent vers un accroissement de l'influence humaine sur le climat. La probabilité que l'influence humaine ait été la cause majeure du réchauffement observé depuis le milieu du XX^{ème} siècle, est extrêmement forte ».

GIEC, 2013³

¹ Cook et al., 2016

² IPCC, 2014a, *Summary for Policymakers*, pp. 4, 15, 21; IPCC 2014d, *Summary for Policymakers*, p. 8.

³ GIEC (IPCC), 2013, Résumé à l'intention des décideurs, p.15

Le « U.S. Global Research Program » aux Etats-Unis se fait également l'écho de ce consensus scientifique :

« Les preuves de l'existence du changement climatique sont innombrables, depuis les hauteurs de la stratosphère jusqu'aux profondeurs des océans. Les scientifiques et ingénieurs du monde entier ont collectionné méticuleusement ces indices, à l'aide de satellites et de réseaux de ballons météorologiques, d'observations des changements de la répartition géographique des espèces, de leurs comportements, et du fonctionnement des écosystèmes. Prises ensemble, toutes ces mesures, toutes ces observations racontent sans ambiguïté la même histoire : la planète se réchauffe, et depuis le dernier demi-siècle, ce réchauffement a été causé principalement par l'activité humaine. »

U.S. Global Change Research Program, 2014⁴

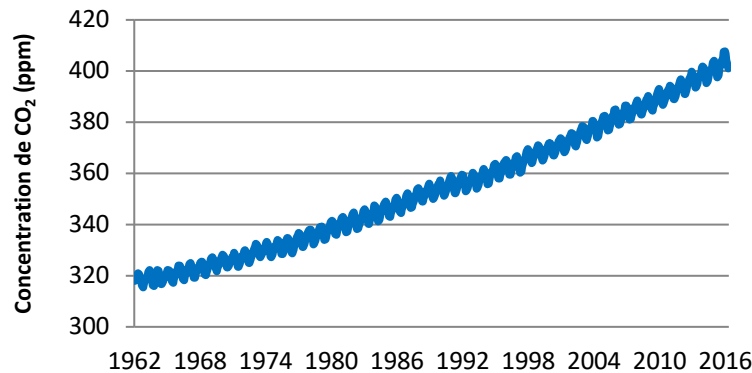
Au fur et à mesure que la compréhension des phénomènes physiques en jeu s'est accrue, l'horizon des projections sur les conséquences à venir du changement climatique n'a cessé de se rapprocher. Ce qui apparaissait il y a dix ans comme une menace pour les générations à venir, à l'horizon de la fin du 21^{ème} siècle et au-delà, est aujourd'hui compris et ressenti comme une menace urgente et immédiate, alors que de nombreux pays font déjà l'expérience de certaines des conséquences les plus destructrices du changement climatique (voir encadré 1).

La compréhension du phénomène de changement climatique au travers de l'analyse économique, nous fait considérer les émissions de **gaz à effet de serre**, qui sont la cause des changements climatiques planétaires, à la fois comme une **externalité** écologique et comme un cas type de surexploitation d'une ressource qui est un **bien commun**.

L'atmosphère est un **bien commun mondial** dans lequel individus et entreprises rejettent toutes sortes de pollutions. La pollution planétaire est un « mal public » supporté par tous – une externalité négative qui a un impact planétaire. Dans plusieurs pays, des lois de protection de l'environnement limitent les quantités de pollution d'air acceptables au niveau local et régional. Dans ces situations, et selon la terminologie économique, les externalités négatives associées à ces pollutions locales et régionales sont dans une certaine mesure « internalisées ». Mais jusqu'à récemment, il n'existait que très peu de contrôle sur les niveaux d'émissions du dioxyde de carbone (CO₂), le principal gaz à effet de serre, et les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère n'ont cessé d'augmenter depuis plusieurs décennies, franchissant le niveau de 400 parties par million (ppm) de concentration atmosphérique (voir Figure 1).

⁴ U.S. Global Change Research Program, p.7.

Figure 1. Niveaux Atmosphériques de Dioxyde de Carbone



Source: National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research laboratory, Global Monitoring Division

<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>

Note: Les variations saisonnières expliquent les oscillations de la courbe alors que chaque année les concentrations de CO₂ varient avec la croissance de la végétation au printemps et sa décomposition à l'automne, mais sur le long terme, la tendance montre une augmentation constante du niveau de CO₂ dans l'atmosphère, mesuré en parties par million c'est-à-dire en nombre de molécules de CO₂ pour un million de molécules présentes dans l'air.

Les impacts du changement climatique ont déjà commencé à affecter le climat de manière significative (encadré 1). On compte parmi ces impacts la fonte des calottes de glace polaires, la montée du niveau des océans, la désintégration des écosystèmes sous-marins, l'augmentation de la rareté des ressources en eau potable dans de larges parties du monde, la fréquence croissante d'événements climatiques extrêmes tels que les ouragans, cyclones, inondations, sécheresses, et la dispersion géographique croissante d'agents pathogènes et de maladies infectieuses. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a estimé que plus de 140000 personnes par an meurent d'une cause directement liée au changement climatique, principalement en Afrique et dans l'Asie du Sud-Est. Un article publié dans l'une des revues scientifiques de médecine les plus prestigieuses du monde, *The Lancet*, basée sur des recherches menées conjointement par des experts de 24 universités et centres de recherches intergouvernementaux à travers le monde, révèle que la santé de centaines de millions de personnes est déjà affectée par le changement climatique.⁵

Si, en effet, les conséquences du changement climatique s'avèrent d'une grande gravité, il serait de l'intérêt de chacun de limiter ces émissions, dans l'intérêt général. La question du changement climatique peut donc s'analyser comme un problème de **bien public**, nécessitant une action commune de collaboration entre toutes les parties impliquées. Puisque le problème est mondial, seul un accord

⁵ Nick Watts et al., "The *Lancet* Countdown on health and climate change: from 25 years of inaction to a global transformation for public health", *The Lancet*, October 30, 2017.

international s'appliquant avec force à toutes les nations, les obligeant à agir pour l'intérêt général est en mesure de prévenir des conséquences écologiques désastreuses.

ENCADRE 1: QU'EST-CE QUE L'EFFET DE SERRE ?

Les rayons du soleil traversent les vitres d'une serre et réchauffent l'air à l'intérieur de la serre, mais le verre empêche que la chaleur ne s'échappe – ainsi les plantes qui ont besoin de climat chaud peuvent être cultivées sous serre, en climat froid. L'effet de serre qui existe sur Terre grâce à l'atmosphère qui, jouant le rôle du verre des vitres d'une serre, emprisonne la chaleur des rayons du soleil, a été décrit pour la première fois en 1824 par le scientifique français Jean-Baptiste Fourier.

Les nuages, la vapeur d'eau, et les gaz à effet de serre que sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane, l'oxyde d'azote, et l'ozone permettent à la radiation solaire de passer au travers de l'atmosphère mais servent de barrière naturelle à la réfraction de la chaleur. Ceci crée un effet de serre, sans lequel la vie n'aurait pas pu apparaître sur Terre. En effet, sans effet de serre, la température à la surface de la Terre serait en moyenne de -18°C, au lieu d'être, de nos jours, d'environ 15°C en moyenne.

La possibilité d'un effet de serre *supplémentaire* ou *produit par l'homme* a été introduite il y a environ un siècle par le scientifique suédois Svante Arrhenius. Il émit alors l'hypothèse que la combustion du charbon entraînerait une concentration accrue de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, ce qui aurait pour conséquence le réchauffement de la Terre.

Depuis l'époque d'Arrhenius, les émissions de gaz à effet de serre ont considérablement augmenté. Les concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ont accru d'environ 35% par rapport aux niveaux de l'époque préindustrielle. Outre l'augmentation de la combustion des combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, les émissions de méthane et d'oxyde d'azote provenant de l'agriculture et de l'industrie ainsi que des substances chimiques synthétiques telles que les chlorofluorocarbures (CFCs), contribuent à l'effet de serre.

Les scientifiques ont développé des modèles informatiques complexes afin d'estimer l'effet des émissions de gaz à effet de serre à court et long terme sur le climat mondial. Bien qu'il existe une grande incertitude inhérente à ces modèles, il y a quasi-unanimité dans la communauté scientifique pour s'accorder sur le fait que l'effet de serre créé par l'activité humaine représente une menace importante pour l'écosystème mondial.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a conclu dans tous ses rapports, en particulier le plus récent, datant de 2014, que la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre s'est accrue depuis 1750 sous l'effet des activités humaines. Selon ce rapport, « l'influence humaine sur le système climatique est claire, et les émissions récentes d'origine anthropogéniques sont les plus élevées dans l'histoire... Le réchauffement du système climatique est incontestable et depuis les années 50, plusieurs des changements observés sont sans précédent dans les siècles voire les millénaires passés. L'atmosphère et les océans se réchauffent, les quantités de neige et de glace ont diminué, et le niveau des mers s'est élevé. » Le GIEC a projeté que les températures globales moyennes augmenteraient de 1.5°C à 4.8°C à l'horizon 2100 par rapport aux niveaux préindustriels. Cette augmentation avait déjà atteint 1°C en 2015, et les températures globales ont battu des records historiques trois années de suite, en 2014, 2015 et 2016.

Source: Fankhauser, 1995; GIEC, 2014a, b, et c. Damian Carrington, "World's climate about to enter uncharted territory as it passes 1°C of warming: " *The Guardian*, 9 November 2015. *The New York Times*, January 18, 2017.

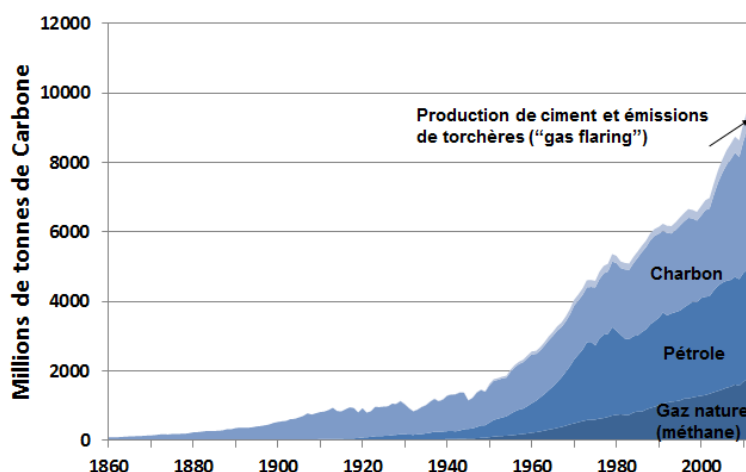
Après des décennies d'échecs à produire un accord au niveau international qui inclurait tous les pays du monde, c'est finalement à Paris, en décembre 2015, et sous les auspices de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, que 195 nations ont accepté de signer le premier accord global visant à limiter l'augmentation des températures moyennes à moins de 2°C. Outre les actions prises au niveau des Etats-Nations, des centaines de villes, de régions, et de corporations ont pris l'engagement de réduire de manière significative leurs émissions de CO₂ dans les 5 à 25 ans à venir, bien que la décision des Etats-Unis sous l'Administration Trump, de se retirer de l'accord de Paris, puisse avoir des conséquences néfastes sur celui-ci. Nous reviendrons plus loin sur les spécificités de l'Accord de Paris.

Parce que le CO₂ et autres gaz à effet de serre s'accumulent continuellement dans l'atmosphère, la stabilisation des émissions ne résoudrait pas le problème. Les gaz à effet de serre demeurent dans l'atmosphère pendant des décennies voire des siècles, continuant d'affecter le climat de la planète entière bien après qu'ils aient été émis. Les gaz à effet de serre sont des **polluants-stock** : seules des réductions majeures des émissions à des niveaux compatibles avec la capacité d'absorption de la biosphère pourraient prévenir des accumulations toujours plus importantes dans l'atmosphère. La mise en œuvre de politiques nationales et internationales de lutte contre le changement climatique pose des défis énormes, soulevant des enjeux scientifiques, économiques et sociaux considérables.

Tendances et projections des émissions de dioxyde de carbone au niveau mondial

Les émissions de dioxyde de carbone au niveau mondial dues à la combustion des combustibles fossiles ont augmenté de façon considérable depuis 1950, comme le montre la Figure 2. En 2013 les émissions totales de carbones étaient de 9,776 milliards de tonnes, ou Gigatonnes (Gt). La combustion du charbon est aujourd'hui responsable d'environ 42 pourcents des émissions de carbone, alors que les combustibles liquides (le pétrole principalement) sont la source de 33 pourcents de ces émissions, la combustion du gaz naturel compte pour 19 pourcents, et 6 pourcents proviennent de la production de ciment et des torchères.⁶ La Figure 2 présente l'historique des émissions sur la période 1965-2015, exprimées en millions de tonnes métriques de CO₂.⁷

Figure 2. Emissions mondiales de Dioxyde de Carbone dues aux combustibles fossiles (1860-2013)



Source: Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC)

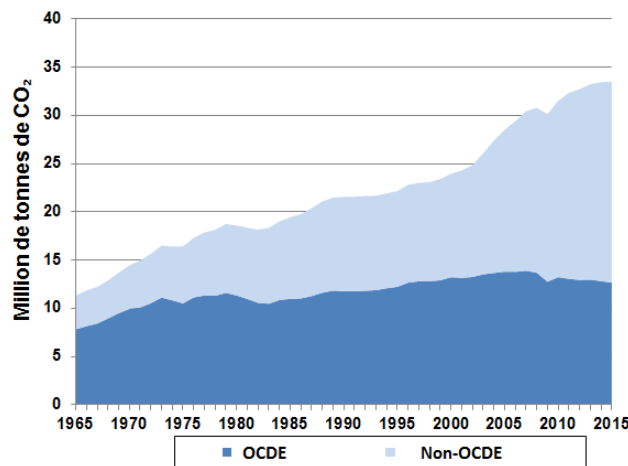
http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2013.ems consulté en Juin 2016. Note: Les émissions sont exprimées en millions de tonnes métriques (MMt) de carbone. Afin de convertir en MMt de CO₂, il faut multiplier par 3.67

La Figure 3 présente la distribution des émissions entre deux groupes de pays, ceux appartenant à l'OCDE, qui inclut principalement les pays industrialisés, et ceux qui ne sont pas membres de l'OCDE – la plupart des pays en développement et la Chine. La part des émissions de l'OCDE a été régulièrement en déclin depuis 2007, et la part des pays non-membres de l'OCDE s'est accrue de manière significative, bien que sa croissance ait récemment ralenti.

⁶ Boden et al, 2016.

⁷ Pour convertir des tonnes de carbone en tonnes de CO₂, il faut multiplier par un facteur 3.667, qui est le ratio 44/12 où 44 est le poids moléculaire du dioxyde de carbone (CO₂) et 12 est le poids moléculaire du carbone.

Figure 3. Emissions de Dioxyde de Carbone de 1965 à 2015, pour les pays membres et non-membres de l'OCDE (en millions de tonnes métriques de CO₂)



Source: U.S. Energy Information Administration

<http://www.eia.gov/forecasts/aeo/data/browser/#/?id=10-IEO2016&sourcekey=0>, consulté en Juin 2016.

Note: L'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) est une organisation composée surtout de pays développés à fort revenu. Ses 34 pays membres sont des pays qui partagent les valeurs de gouvernement démocratique et d'économie de marché. Les pays ne faisant pas partie de l'OCDE sont principalement des pays en développement. Certains pays émergents tels que le Mexique, le Chili et la Turquie font désormais partie de l'OCDE.

L'axe vertical de la Figure 3 mesure des millions de tonnes métriques de dioxyde de carbone (le poids des émissions exprimé en tonnes de dioxyde de carbone est de 3,67 fois son poids exprimé en carbone). Les estimations données ici par le U.S. EIA sont donc légèrement différentes de celles données par le CDIAC présentées dans la Figure 2.

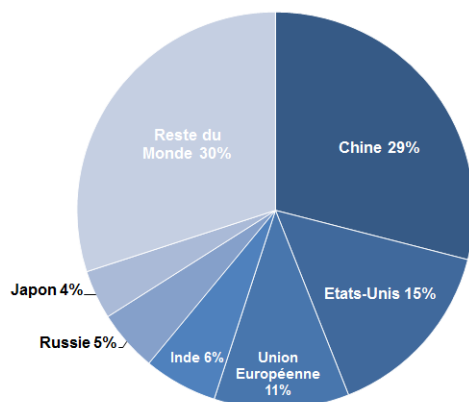
Le niveau d'émissions est fortement corrélé avec les cycles économiques, et la récession de 2008-2009 est clairement visible sur la Figure 3. Autre fait marquant, les émissions de CO₂ semblent avoir atteint un plateau en 2014, 2015 et 2016 autour de la figure de 33 milliards de tonnes (33 gigatonnes) de CO₂. Ceci s'explique en partie par un ralentissement de la croissance économique globale (avec la diminution du taux de croissance économique de la Chine). Ce nivellement reflète aussi l'accroissement des investissements dans les énergies renouvelables (solaire et éolien), qui sont majoritaires parmi les nouveaux investissements en capacités de production d'énergie dans les dernières années. Cette tendance est en train d'avoir un impact significatif en réduisant les émissions de CO₂ du secteur énergétique.

Dans les pays industrialisés, on a effectué la transition du charbon au gaz naturel et aux énergies renouvelables, ce qui a baissé le niveau des émissions de CO₂. Dans les pays en développement, la production de charbon est toujours en expansion, mais

une part croissante des nouveaux investissements en production énergétique provient des énergies renouvelables.⁸ On ne sait pas encore si ce nivellement des émissions est un phénomène temporaire ou bien s'il est le signe que la tendance globale des émissions est à la baisse.

La Figure 4 présente la distribution des émissions de CO₂ parmi les principaux pays émetteurs : la Chine (29%), les Etats-Unis (15%), l'Union Européenne (11%), l'Inde (6%), la Russie (5%), le Japon (4%), et le reste du monde (30%). La grande majorité de la croissance anticipée des émissions de gaz à effet de serre provient des pays en expansion rapide tels que la Chine et l'Inde. La Chine a devancé les Etats-Unis en 2006 comme principal émetteur.

Figure 4. Pourcentage des émissions globales de CO₂ par pays/région



Source: Jos G.J. Olivier et al., European Commission's Joint Research Centre, 2014. "Trends in global CO₂ emissions : 2014 Report" http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news_docs/jrc-2014-trends-in-global-co2-emissions-2014-report-93171.pdf

Outre les émissions totales par pays, il est important de considérer le niveau d'émissions par habitant. Ce niveau est beaucoup plus élevé dans les pays riches comme le montre la Figure 5. Les taux les plus hauts s'observent dans les pays du Golfe, tels que le Qatar (40 tonnes de CO₂), le Koweït (34 tonnes par personne) ou les Emirats Arabes Unis (22 tonnes par personne). Les Etats-Unis ont le taux le plus élevé parmi les nations les plus importantes, avec 17 tonnes métriques de CO₂ par personne.

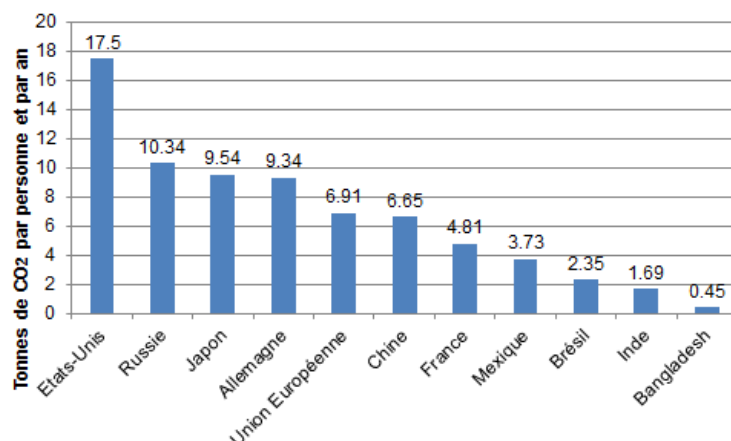
Parmi les pays présentant des niveaux élevés d'émissions par personne on compte l'Australie avec 16,7 tonnes par personne, et le Canada avec 14,6. La Russie présente une moyenne de 10 tonnes par personnes, et la plupart des autres pays développés se situe dans un intervalle entre 4 à 10 tonnes par personne.⁹ Les pays

⁸ International Energy Agency, 16 March 2016
<https://www.iea.org/newsroomandevents/pressreleases/2016/march/decoupling-of-global-emissions-and-economic-growth-confirmed.html>

⁹ Le classement des pays selon leurs émissions par habitant est consultable sur ce lien :
<http://cotap.org/per-capita-carbon-co2-emissions-by-country/>

en développement ont généralement des taux bas, inférieurs à 2 tonnes de CO₂ par habitant, à l'exception de la Chine dont le taux d'émissions est monté à 6,6 tonnes par personne.

Figure 5. Les taux d'émissions de Dioxyde de Carbone par habitant, selon les pays



Source: British Petroleum, Energy Charting Tool 2015.

Tendances et Projections du Changement Climatique

La Terre s'est réchauffée de façon significative depuis qu'existent les premiers relevés fiables de températures, au milieu du XIX^{ème} siècle (Figure 6). Depuis les 100 dernières années, la température moyenne mondiale s'est élevée d'environ 1°C. Quatorze des quinze années les plus chaudes depuis les débuts des enregistrements météorologiques se sont produites depuis 2000 jusqu'en 2015.¹⁰ Le record de l'année 2014 a été dépassé par celui de l'année 2015, lui-même dépassé par les températures de l'année 2016,¹¹ qui furent en moyenne d'environ 1,1°C au-dessus des niveaux préindustriels.¹² Les observations scientifiques montrent que le taux de réchauffement, à l'heure actuelle d'environ 0,13°C par décennie, est en augmentation. Le laboratoire national pour la région du Nord-Ouest du Pacifique, du Département de l'Energie des Etats-Unis, a estimé que le taux d'augmentation des températures pourrait être de 0,25°C par décennie à partir de 2020.¹³

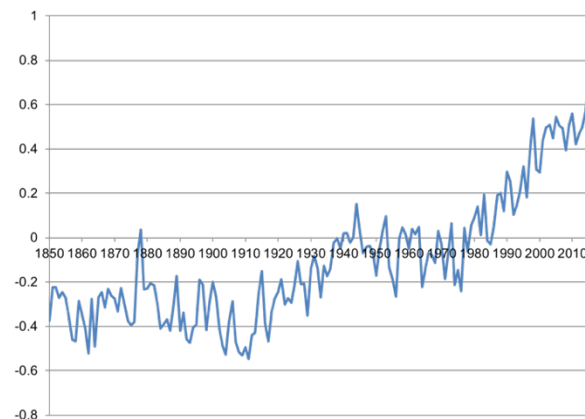
¹⁰ NOAA 2012; Damian Carrington, "14 of the 15 hottest years on record have occurred since 2000, UN says", *The Guardian*, February 2, 2015.

¹¹ NASA, January 18, 2017. <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-data-show-2016-warmest-year-on-record-globally>

¹² *New York Times*, January 18th, 2017. https://www.nytimes.com/2017/01/18/science/earth-highest-temperature-record.html?_r=0

¹³ *The Guardian*, March 9, 2015. "Global warming "set to speed up to rates not seen for 1,000 years". <https://www.theguardian.com/environment/2015/mar/09/global-warming-set-to-speed-up-to-rates-not-seen-for-1000-years>

Figure 6. Les fluctuations observées dans les températures annuelles globales (°C), 1850–2015



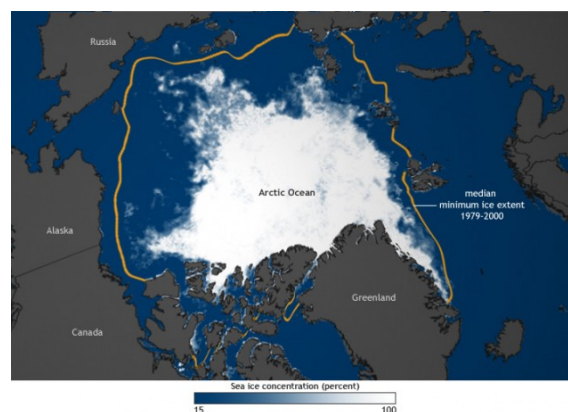
Source: Carbon Dioxide Information Analysis Center CDIAC, anomalies globales mensuelles et annuelles des températures (en °C), 1850-2015, par rapport à la moyenne de la période 1961-1990. Données relevées en Mai 2016.

<http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/temp/jonescru/global.txt>

Note: La base de référence (zéro) représente la température mondiale moyenne pendant la période 1961-1990.

Toutes les régions ne sont pas affectées de la même manière. L'Arctique et l'Antarctique se sont réchauffés à un taux deux fois supérieur au taux mondial moyen.¹⁴ La fonte des glaces de l'Arctique est à la fois une conséquence du changement climatique et une cause de l'accélération de celui-ci car la surface de l'océan absorbe davantage l'énergie solaire que la glace, celle-ci renvoyant les rayons du soleil – ce qu'on appelle phénomène d'albédo – et on peut observer la réduction de la calotte glaciaire arctique sur la Figure 7.

Figure 7: La réduction de la surface de la Banquise Polaire Arctique



Source: <http://thinkprogress.org/climate/2014/02/18/3302341/arctic-sea-ice-melt-ocean-absorbs-heat/>. A partir de données provenant du National Snow and Ice Data Center.

Crédit: Climate.gov.

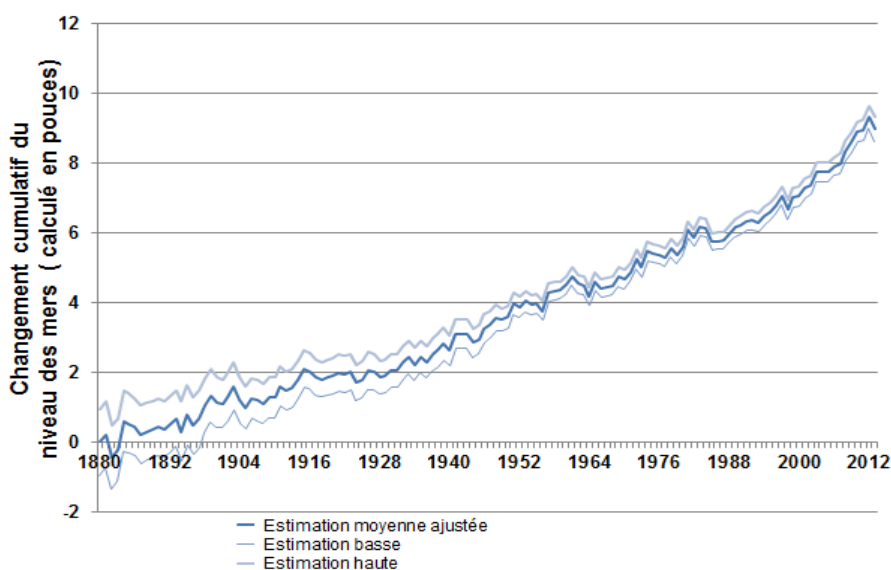
Note: le trait en jaune marque l'extension minimale de la calotte glaciaire telle qu'elle était pendant la période 1979-2000

¹⁴ IPCC, 2007a, Working Group I: The Physical Science Basis.

Ces températures chaudes ont produit des effets notables sur les écosystèmes. Dans la plupart des régions du monde, les glaciers sont en retrait. Par exemple, le Glacier National Park dans le Montana, aux Etats-Unis, avait 150 glaciers quand cette réserve naturelle a été fondée en 1910. En 2010, il ne restait que 25 glaciers et l'on estime qu'en 2030 le parc n'aura plus aucun des glaciers qui lui ont donné son nom.¹⁵

Le changement climatique conduit également à la montée du niveau des océans. Ce phénomène est dû à la fonte des glaciers et de la banquise polaire, et au fait que l'eau se dilate quand elle se réchauffe. En 2012, la température globale de l'océan était en moyenne de 0.5°C supérieure à celle de la moyenne du XXème siècle. La combinaison du réchauffement des océans et de la fonte des glaces a conduit à une hausse du niveau des océans d'environ 2 millimètres par an. En 2012, le niveau des mers avait déjà atteint 23cm de plus qu'il n'était en 1880 (voir la Figure 8 et l'encadré 2).¹⁶

Figure 8. La montée du niveau des océans, 1880–2012



Source: IPCC, 2014a

Note: les données sont en pouces : 1 pouce = 2,54 cm. Le niveau des océans en 2012 était de 10 pouces (soit 25cm) plus élevé que le niveau de 1880. La courbe du milieu montre une estimation moyenne basée sur un nombre important de données observées. Les courbes supérieure et inférieure représentent respectivement les niveaux haut et bas de ces estimations, étant donné les marges d'erreur. On observe que pour la période la plus récente, cette marge d'erreur s'amenuise.

¹⁵ https://www.usgs.gov/centers/norock/science/retreat-glaciers-glacier-national-park?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects=0

¹⁶ NOAA, 2012.

ENCADRE 2: DES ÎLES DU PACIFIQUE DISPARAISSENT SOUS LA MONTÉE DES EAUX

La petite Nation de Kiribati dans l'Océan Pacifique, qui compte 33 îles et atolls formés par la barrière de corail, et qui ne dépassent pas 1,80 mètres au-dessus du niveau de l'Océan Pacifique, sur une étendue d'environ deux fois l'Alaska, fait face à la menace d'un engloutissement dans les quelques décennies à. Deux de ses îles – Tebua Tarawa et Abanuea – ont déjà disparu sous les eaux à cause de l'élévation du niveau des mers. D'autres, appartenant à Kiribati ainsi qu'à la nation voisine de Tuvalu, sont sur le point de disparaître. Jusqu'à présent l'océan a recouvert de petits ilots inhabités mais la crise grandit autour des atolls.

Le peuple de Tuvalu a la plus grande difficulté venir à pratiquer l'agriculture à cause des infiltrations d'eau de mer qui empoisonnent de sel les sols. Plusieurs îles deviendront inhabitables bien avant qu'elles disparaissent physiquement, au fur et à mesure que le sel contamine les ressources en eau douce dont dépend la population. La situation est si dramatique que les leaders de Kiribati sont en train de considérer l'option d'évacuer la population entière de la nation, soit 110000 habitants, vers les îles Fiji. Déjà plusieurs villages ont été évacués.

Sources: Mike Ives, "A Remote Pacific Nation, Threatened by Rising Seas." *New York Times*, July 2, 2016. "Kiribati Global Warming Fears: Entire Nation May Move to Fiji," *Associated Press*, March 12, 2012

L'impact de l'élévation du niveau des océans menace de nombreuses zones côtières à travers le monde, par exemple, aux Etats-Unis, le gouvernement (sous l'Administration Obama) a identifié que 31 villes de l'Alaska courraient un risque imminent, et on observe que la Floride connaît déjà des dommages importants causés par des épisodes de plus en plus fréquents d'inondations.¹⁷ Miami Beach a investi plus de 400 millions de dollars pour faire face à ces inondations récurrentes, qui ont lieu non seulement pendant les épisodes d'ouragan mais aussi au cours de ce qu'on appelle les "king tides" c'est-à-dire les grandes marées qui ont lieu deux fois par an quand les orbites et les alignements de la Terre, de la Lune et du Soleil se combinent pour former les marées les plus importantes de l'année.¹⁸

Les résidents de plusieurs villes côtières qui ont fait l'expérience d'une recrudescence de la fréquence des inondations sont inquiets de la perte de valeur de leurs biens immobiliers. L'industrie des assurances est en première ligne dans ce défi, et d'après le Président de la « Reinsurance Association of America », « le changement climatique pourrait provoquer l'effondrement de tout le secteur de l'assurance ».¹⁹

¹⁷ Erica Goode, "A Wrenching Choice for Alaska Towns in the Path of Climate Change," *New York Times*, November 29, 2016; "Intensified by Climate Change, 'King Tides' Change ways of Life in Florida," *New York Times*, November 17, 2016

¹⁸ *New York Times*, November 17, 2016. *ibid.*

¹⁹ Eugene Linden, "How the insurance industry sees Climate Change", *Los Angeles Times*, June 16, 2014;

Des recherches récentes sur la banquise de l'Antarctique de l'Ouest ont montré qu'une zone plus vaste que le Mexique était potentiellement vulnérable à une augmentation relativement faible des températures et pourrait alors se désintégrer, conduisant alors à une hausse du niveau des océans de 3,65 mètres ou plus si cela devait se produire. Même si ce scénario catastrophiste ne se matérialisait pas, les chercheurs anticipent de toute manière une hausse du niveau des océans de 1,5 à 1,8 mètres à l'horizon de 2100, et ce niveau continuerait à s'accroître tout au long du 22^{ème} siècle à un rythme de plus de 30cm par décennie.²⁰

Outre l'élévation de la température des océans, l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère conduit à l'acidification des océans. Selon le U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration,

« environ la moitié de tout le dioxyde de carbone produit par les humains depuis la Révolution Industrielle s'est dissout dans les océans. Cette absorption a ralenti le processus du réchauffement climatique, mais il a aussi diminué le pH des océans, rendant ceux-ci plus acides. Une plus grande acidité de l'eau se traduit par une plus grande corrosion des minéraux dont dépendent de nombreuses espèces sous-marines pour construire leurs coquilles et leurs squelettes. »²¹

Un rapport du magazine *Science* de 2012 a révélé que les océans sont en train de s'acidifier à une vitesse si élevée qu'elle ne s'est probablement pas produite depuis 300 millions d'années, avec des conséquences potentielles désastreuses pour les écosystèmes marins.²² Les barrières de corail sont parmi les premières victimes du réchauffement et de l'acidification des océans, car les coraux ne peuvent se former que dans un environnement marin variant très peu en température et en acidité. L'année 2015 a été témoin d'un record de mortalité des coraux, que l'on visualise par leur blanchissement, et qui fut le résultat de la combinaison d'une température déjà élevée de l'eau des océans, due au réchauffement climatique, et de l'épisode le plus puissant du siècle du phénomène cyclique d'El Niño (réchauffement du Pacifique).²³ Les élevages d'huîtres sont également affectés et on les compare souvent aux « canaris dans les mines de charbon » car ils peuvent prédire à l'avance les effets sur les écosystèmes marins de l'augmentation de l'acidité des océans.²⁴

²⁰ DeConto and Pollard, 2016.

²¹ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2010.

²² Hönisch et al., 2012; Deborah Zabarenko, "Ocean's Acidic Shift may be Fastest in 300 Million Years," *Reuters* March 1, 2012.

²³ Roger Bradbury, "A World without Coral Reefs," *New York Times* July 14, 2012; NOAA, "Scientists Find Rising Carbon Dioxide and Acidified Waters in Puget Sound" 2010; Michelle Inis, "Climate-related death of coral around the world alarms scientists" *New York Times*, April 9, 2016; http://www.noaanews.noaa.gov/stories2010/20100712_pugetsound.html; <http://www.pmel.noaa.gov/co2/story/Going+Green%3A+Lethal+waters>

²⁴ Coral Davenport, "As oysters die, climate policy goes on the stump," *New York Times* August 3, 2014.

Les écosystèmes terrestres sont également sévèrement impactés par le changement climatique (Encadré 3).

ENCADRÉ 3. L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FORÊTS

Les incendies de forêts étaient il y a encore peu de temps des événements qui avaient lieu uniquement de manière saisonnière, en été, à la période sèche. Aujourd'hui c'est un phénomène que l'on observe toute l'année dans les Etats de l'Ouest des Etats-Unis, ainsi qu'au Canada et en Australie. En Mai 2016, l'Etat de l'Alberta au Canada a été dévasté par des incendies de forêts qui s'étendaient sur près de 600 km, et qui ont conduit à l'évacuation de tous les 80000 habitants de la ville de Fort McMurray, qui a souffert les dommages les plus importants. En Octobre 2017, c'est toute la Napa Valley, dans le Nord de la Californie qui est partie en flammes, faisant plus de quarante morts et des pertes estimées à plus d'un milliard de dollars.

Le changement climatique est considéré comme la cause principale de la recrudescence des feux de forêts. Le réchauffement a des répercussions particulièrement graves dans les régions septentrionales : c'est dans le Nord que les températures augmentent le plus par rapport au reste de la Planète, et la couverture de neige y fond prématurément ce qui entraîne un dessèchement des forêts plus tôt dans l'année que par le passé.

Les hivers secs entraînent un manque d'humidité sur les sols et l'excès de chaleur peut être une des causes d'embrasement, à l'origine des feux les plus dévastateurs.

Selon un chercheur du United States Forest Service : "Dans certaines zones, la saison des feux de forêts dure désormais toute l'année et on pourrait dire que ça ne peut pas être pire que ça ne l'est. Mais tout nous pousse à croire que les choses vont en fait empirer." En 2015, le Service des Forêts des Etats-Unis a dépensé plus de la moitié de son budget à combattre les incendies de forêts, aux dépens de programmes tels que la réduction des risques d'incendies. Les scientifiques craignent que si les destructions des forêts par les feux et par la recrudescence d'insectes continuent de croître, le carbone qui a été emprisonné dans les forêts va être relâché dans l'atmosphère en tant que CO₂, contribuant à l'accélération du processus de changement climatique – ce qui constituerait une boucle rétroactive très dangereuse.

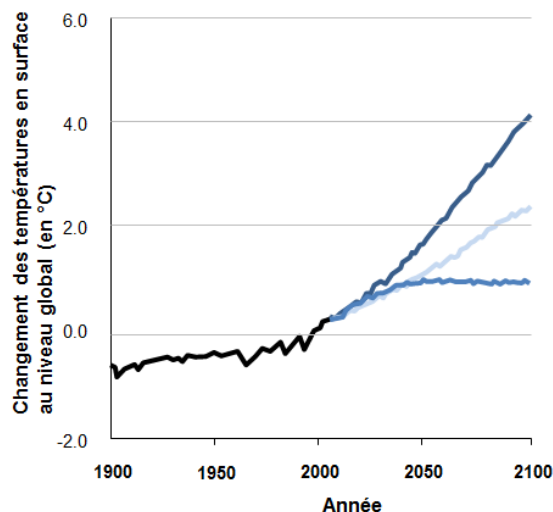
Sources: Matt Richtel and Fernanda Santos, "Wildfires, once confined to a season, burn earlier and longer" *New York Times*, April 12, 2016; Ian Austen, "Wildfire empties Fort McMurray in Alberta's oil sands region," *New York Times*, May 3, 2016. California Wildfires Losses are estimated at over \$1 billion, insurance officials said. October 19, 2017. <http://fortune.com/2017/10/19/california-wildfire-losses-insurance-estimates-property/>

Les projections futures sur le changement climatique dépendent des évolutions des émissions futures. Même si toutes les émissions de gaz à effet de serre s'arrêtaient aujourd'hui, le monde connaîtrait un réchauffement au cours des quelques décennies à venir en raison des effets décalés dans le temps des émissions (l'impact d'émissions actuelles ne se faisant ressentir que dans plusieurs années). En particulier, les niveaux des océans continueraient de monter.²⁵ En se fondant sur une grande variété de modèles avec des hypothèses différentes sur les émissions à venir, le GIEC a estimé dans son rapport de 2014 que l'augmentation de la température moyenne de la surface du globe serait de 1.5°C à 4.8°C au-dessus des niveaux préindustriels, à moins que des actions drastiques de réduction des émissions n'aient lieu immédiatement.²⁶

Un article de la Revue Nature publié en Juin 2017 rappelle l'urgence de cette action en montrant que les prévisions scientifiques ne donnent à l'humanité qu'une fenêtre d'opportunité de trois ans,²⁷ jusqu'en 2020, pour réussir le tournant de la transition énergétique qui permettrait de garder le cap de l'objectif fixé en 2015 par l'Accord de Paris, c'est-à-dire de rester en-deçà d'un réchauffement de 2°C.

Les figures 9 et 10 présentent l'étendue possible des accroissements de températures, la Figure 10 montrant deux scénarios diamétralement opposés, l'un de réchauffement minimal de la Planète, l'autre de réchauffement maximal.

Figure 9. Tendances globales d'accroissement des températures sur la période 1900-2014, et trois scénarios de projections de 2014 à 2100



Source: GIEC (IPCC) 2014c, Summary for Policymakers, p. 13.

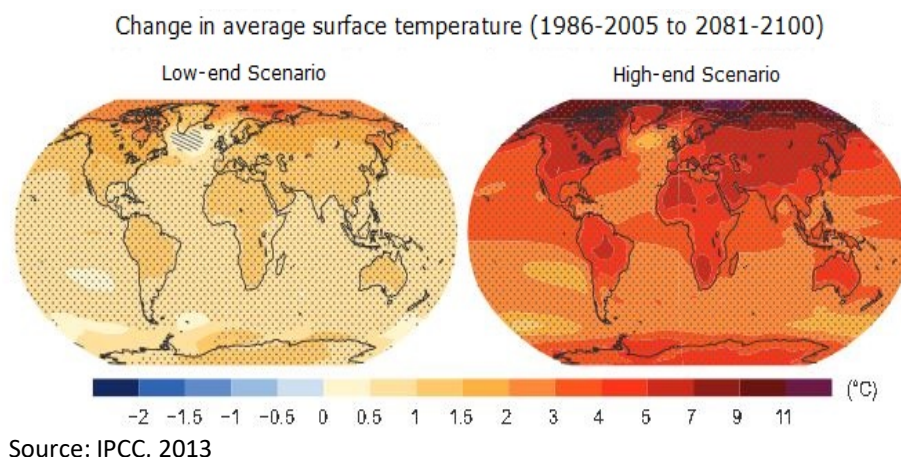
Note: La figure montre des projections pour trois scénarios correspondant à des degrés d'émissions faible, moyen et élevé. L'étendue possible de l'augmentation de températures dans tous les modèles du GIEC est très large, entre 0.3 et 4.8°C

²⁵ Jevrejeva et al., 2012; <http://www.skepticalscience.com/Sea-levels-will-continue-to-rise.html>.

²⁶ IPCC, 2014b, pp. 59-60.

²⁷ Christiana Figueres et al. « Three Years to Safeguard our Climate », *Nature*, June 28, 2017.

Figure 10. Tendances des températures globales projetées en 2100 – deux scénarios



L'amplitude réelle du réchauffement et des autres effets dépendra du niveau auquel les concentrations atmosphériques de CO₂ et des autres gaz à effet de serre se stabiliseront en définitive. Les niveaux de concentration préindustriels étaient de 280 parties par millions (ppm). En 2008, une publication scientifique par les climatologues James Hansen et Rajendra Pachauri, le président du GIEC, déclarait que "si l'humanité veut préserver une planète semblable à celle sur laquelle la civilisation humaine s'est développée et à laquelle la vie sur Terre s'est adaptée, les observations paléo-climatiques montrent que le niveau de concentration de CO₂ dans l'atmosphère ne doit pas dépasser 350ppm." ²⁸

En 2015, la concentration atmosphérique de CO₂ a dépassé le niveau critique de 400ppm.²⁹ Lorsque l'on considère la contribution des autres gaz à effet de serre, l'effet total est équivalent à une concentration de 430 ppm de CO₂ – concentration que l'on appelle **équivalent CO₂ ou CO₂e**.³⁰ Ce niveau de CO₂ n'a pas eu lieu depuis 800000 ans.³¹

La figure 11 ci-dessous met en relation le niveau de stabilisation des gaz à effet de serre, mesuré en nombre de CO₂e, avec l'accroissement des températures moyennes qui en résulte, ce qui inclut un degré d'incertitude. Les lignes horizontales en trait plein dans la figure 11 représentent l'étendue des températures possibles avec une probabilité de 90%. Les traits en pointillé s'étendant de part et d'autre des traits pleins représentent l'étendue des prédictions complètes résultant des modèles existant. La ligne verticale au milieu de chaque trait plein représente la médiane pour chacune des prédictions.

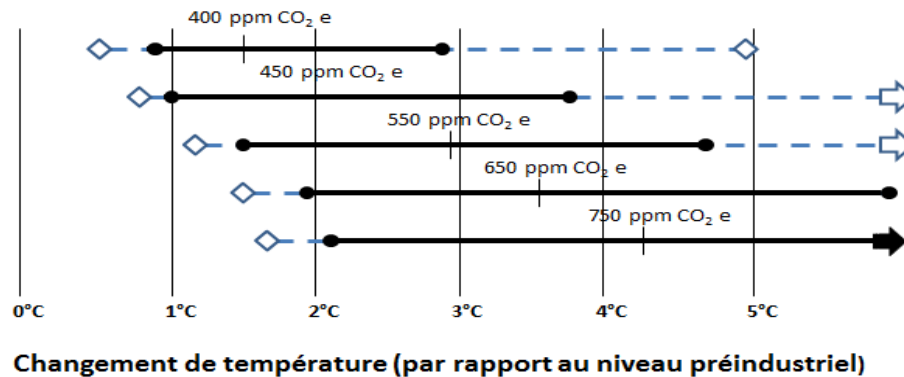
²⁸ Hansen et al, 2008.

²⁹ Adam Vaughan, "Global carbon dioxide levels break 400ppm milestone," *The Guardian*, May 6, 2015.

³⁰ IPCC, 2013

³¹ Andrea Thompson, "2015 begins with CO₂ above 400ppm mark", Climate Central, January 12, 2015, www.climatecentral.org/news/2015-begins-with-co2-above-400-ppm-mark-18534

Figure 11. La relation entre le niveau de stabilisation des gaz à effet de serre et les changements éventuels de température



Source: Stern, 2007.

Note: CO₂e = CO₂ équivalent ; ppm = parties par million.

Cette projection montre que si les concentrations de gaz à effet de serre se stabilisaient à 450 ppm CO₂e, il y aurait une probabilité de 90% que les températures augmentent entre 1.0 et 3.8°C, avec une médiane de 2°C et une faible probabilité que cette augmentation soit supérieure à 3.8°C. Compte tenu du fait que les concentrations de gaz à effet de serre sont actuellement de 430 ppm CO₂e, une stabilisation à 450 ppm représente un défi quasi insurmontable à moins d'être capable dans l'avenir de reprendre du CO₂ de l'atmosphère et de le stocker de manière massive. Même une stabilisation à 550 ppm CO₂e – qui entrainerait une augmentation de la température moyenne d'environ 3°C – nécessiterait une prise de décision politique mondiale drastique.

2. L'ANALYSE ECONOMIQUE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les scientifiques ont modélisé les effets d'un doublement des niveaux accumulés de dioxyde de carbone dans l'atmosphère terrestre. Certaines de leurs prédictions sont les suivantes :

- Perte de terres sous la montée des eaux, en particulier de plages et de marais
- Perte de biodiversité et de surfaces de forêts, dues notamment à la disparition des barrières de corail et des marais et mangroves
- Contamination des sources d'eau douce et problèmes de rareté de l'eau pour l'agriculture et la consommation urbaine
- Accroissement des problèmes de santé publique et de la mortalité due aux vagues de chaleur et à la progression des maladies tropicales
- Augmentation des coûts liés à la climatisation
- Perte de récoltes agricoles en raison de sécheresses

Il se peut que quelques-uns des effets soient positifs tels que :

- Augmentation de la production agricole dans les climats froids
- Diminution des coûts de chauffage
- Diminution de la mortalité causée par l'exposition au froid

Les effets bénéfiques potentiels ne devraient se produire que dans les contrées les plus septentrionales de l'hémisphère Nord telles que l'Islande, la Sibérie et le Canada. La plupart des autres régions du monde, surtout dans les zones tropicales et semi-tropicales, auront de grandes probabilités de connaître de forts effets négatifs. Les projections du GIEC montrent qu'avec des émissions croissantes et des températures plus élevées, les effets négatifs iront en s'intensifiant alors que les éventuels effets positifs s'estomperont (Tableau 1).

Tableau 1. Effets Possibles du changement climatique

Type d'impacts	Augmentation de la température par rapport aux niveaux préindustriels				
	1°C	2°C	3°C	4°C	5°C
Ressources d'eau douce	Disparition de glaciers de petite taille dans les Andes, menaçant les ressources en eau de 50 millions de personnes	Diminution potentielle des ressources en eau de 20 à 30% dans certaines régions (Sud de l'Afrique et bassin méditerranéen)	Graves sécheresses dans le Sud de l'Europe tous les 10 ans – de 1 à 4 milliards de personnes souffrent de restrictions d'eau	Diminution des ressources de 30 à 50% au Sud de l'Afrique et en méditerranée	Les larges glaciers de l'Himalaya disparaissent affectant un quart de la population chinoise
Agriculture et Alimentation	Légère augmentation des rendements dans les régions tempérées	Déclins des rendements agricoles dans les régions tropicales (5 à 10% en Afrique)	De 150 à 550 million de personnes supplémentaires en situation de malnutrition et de faim - les récoltes atteignent leur maximum dans les latitudes élevées	Les récoltes déclinent de 15 à 35% in Afrique et des régions entières ne sont plus capables de produire d'agriculture	Augmentation de l'acidité de l'océan réduit les ressources halieutiques
Santé publique	Au moins 300,000 personnes meurent chaque année de maladies liées au climat – dans les hautes altitudes, diminution de la mortalité liée au froid et à l'hiver	De 40 à 60 millions de personnes en plus sont exposées à la malaria en Afrique	De 1 à 3 million de personnes supplémentaires meurent chaque année de malnutrition	Jusqu'à 80 millions de personnes supplémentaires sont exposées à la malaria en Afrique	Accroissement des maladies - services de santé publique soumis à une pression croissante
Surfaces côtières	Inondations côtières causant des dommages croissants	Jusqu'à 10 millions de personnes supplémentaires sont exposées aux inondations côtières	Jusqu'à 170 millions de personnes supplémentaires sont exposées à des inondations côtières	Jusqu'à 300 millions de personnes supplémentaires sont exposées aux inondations côtières	La montée du niveau des océans menace des villes majeures telles que New York, Tokyo et Londres
Ecosystèmes	Au moins 10% des espèces terrestres sont menacées d'extinction – risques accrus de feux de forêts	15 à 40% des espèces sont potentiellement menacées d'extinction	20 à 50% des espèces sont potentiellement menacées d'extinction. Possibilité d'un effondrement de l'écosystème de la forêt amazonienne	Perte de la moitié de la Toundra Arctique – larges pertes des barrières de corail	Taux élevés d'extinction à travers le globe

Sources: Stern, 2007; GIEC, 2007.

S'ajoutent à ces effets d'autres conséquences moins prévisibles mais potentiellement plus destructrices, en particulier :

- La modification des régimes climatiques, s'accompagnant d'une fréquence accrue d'ouragans et autres événements climatiques extrêmes
- La fonte possible des glaces du Groenland et de l'Antarctique occidental, ce qui aurait pour conséquence une montée des océans d'au moins 12 mètres et provoquerait la disparition de nombreuses villes côtières dont plusieurs mégapoles.
- Le changement soudain de constantes climatiques, tel qu'un brusque changement de direction du Gulf Stream dans l'Atlantique Nord, qui aurait pour conséquence de transformer le climat de l'Europe en celui de l'Alaska
- Le déclenchement de **boucles rétroactives positives**,³² aux effets exponentiels dévastateurs, tel que le réchauffement de la toundra arctique entraînant un relâchement dans l'atmosphère de quantité de CO₂ et de méthane considérables qui aurait pour effet une accélération du réchauffement climatique.

Comme le montre la figure 9, il existe une incertitude considérable sur le réchauffement climatique au cours du siècle. On se doit de conserver présentes à l'esprit ces incertitudes en abordant toute analyse économique du changement climatique mondial.

Compte tenu de ces incertitudes, certains économistes ont tenté de placer l'analyse du changement climatique mondial dans le contexte de **l'analyse coût-bénéfice**. D'autres ont critiqué cette approche essayant de chiffrer des enjeux aux conséquences sociales, politiques et écologiques, allant bien au-delà de toute valeur monétaire qu'on puisse leur attribuer. Nous examinerons d'abord les tentatives des économistes de capturer les impacts du changement climatique au travers de l'analyse des coûts et bénéfices, puis nous reviendrons sur le débat relatif à l'application des politiques de réduction de gaz à effet de serre.

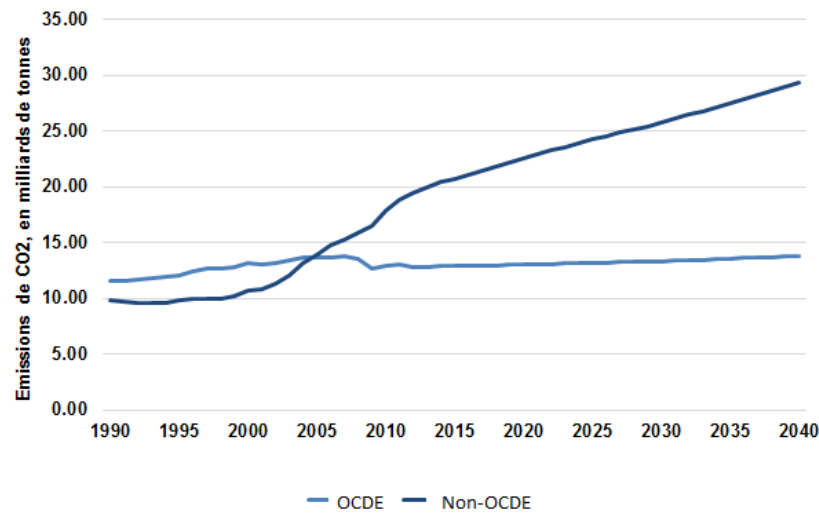
Analyses Coût-Bénéfice du Changement Climatique Mondial

En l'absence d'intervention politique, dans un scénario où rien ne change, encore appelé "business-as-usual", on peut s'attendre à ce que les émissions de carbone continuent d'augmenter comme indiqué sur la figure 12. Ces projections reposent cependant sur des tendances qui ne considèrent pas les impacts des politiques de réduction des émissions futures. Une action politique immédiate et déterminée est nécessaire pour d'abord stabiliser puis réduire les émissions totales de CO₂ dans les

³² Une boucle rétroactive représente un phénomène pour lequel un changement du système entraîne des conséquences qui agissent en réaction sur le système, allant soit dans le même sens que le changement initial (boucle rétroactive positive, à effet exponentiel) soit dans le sens opposé au changement initial (boucle rétroactive négative, autorégulée autour d'un équilibre homéostatique)

prochaines décennies. C'est l'objectif de l'accord de Paris de 2015. Afin de comprendre l'ensemble des questions impliquées dans la réduction des émissions, on doit examiner les implications économiques de telles politiques.

Figure 12. Émissions de Dioxyde de Carbone provenant de la consommation d'énergie – avec projection à l'horizon 2040



Source: EIA, 2016.

Dans toute analyse coût-bénéfice, on doit mesurer les conséquences de la projection de l'augmentation des émissions de carbone et les comparer aux coûts des politiques visant à stabiliser ou même à réduire les émissions de CO₂. Des politiques appliquant une action forte permettant de prévenir le changement climatique apporteront des bénéfices égaux en valeur aux coûts des dommages évités. On appelle aussi ces bénéfices provenant du fait que des dommages futurs sont évités, des **coûts évités**. Les bénéfices estimés doivent ensuite être comparés aux coûts de l'action.

Plusieurs études économiques ont tenté d'estimer les bénéfices et les coûts des actions politiques contre le changement climatique. Ces tentatives de mettre des valeurs monétaires sur les coûts du changement climatique posent des problèmes éthiques inhérents. En général, ces études peuvent seulement capturer les effets du changement climatique dans la mesure où ils ont un impact en termes de production économique, ou bien s'ils ont des impacts hors-marché mais qui peuvent être exprimés en termes monétaires. Certains secteurs de l'économie sont potentiellement vulnérables aux effets du changement climatique, en particulier l'agriculture, la sylviculture, la pêche, le secteur de l'immobilier dans les zones côtières, ainsi que les transports dans ces mêmes zones. Mais tous ces secteurs ne

comptent que 10% du PIB. D'autres secteurs tels que l'industrie, les services et la finance sont considérés comme étant peu affectés par le changement climatique.³³

Une estimation des impacts sur le PIB aura donc tendance à omettre certains des effets écologiques les plus dévastateurs du changement climatique. Selon l'économiste William Nordhaus, qui a écrit plusieurs études de coûts-bénéfices sur le changement climatique depuis une vingtaine d'années :

... les aspects les plus destructeurs du changement climatique – dans des systèmes naturels et humains impossibles à contrôler ni à gérer – relèvent de phénomènes qui sont bien au-delà de l'économie de marché. J'en ai identifié quatre qui sont particulièrement inquiétants: la montée du niveau des océans, l'intensification des phénomènes climatiques extrêmes tels que les ouragans, l'acidification des océans, et la perte de la biodiversité. Il est désormais au-delà des capacités humaines de mettre un frein à ces quatre phénomènes. On doit ajouter à cette liste les singularités systémiques, ou points de bifurcation irréversibles, tels que l'instabilité de la banquise et le changement potentiel des courants marins. Ces impacts ne sont pas seulement difficiles à mesurer et à quantifier en termes économiques; ils sont également difficiles à gérer d'un point de vue économique et technique. Mais dire qu'il est difficile de les quantifier et de les contrôler ne veut pas dire qu'on doive les ignorer. Bien au contraire, ces systèmes doivent être étudiés de très près car ce sont eux dont les changements sont très vraisemblablement les plus dangereux dans le long terme³⁴...

Les analyses coûts-bénéfices donnent également lieu à des controverses car elles donnent une valeur marchande à la vie humaine et à la santé. La plupart des études suivent la pratique d'assigner à une vie humaine une valeur de 8 à 11 millions de dollars – ce chiffre provenant d'études où l'on demande ce que les gens sont prêts à payer pour éviter des risques mettant la vie en danger, ou sont prêts à accepter (en termes de salaire supplémentaire pour les travaux dangereux) pour prendre de tels risques. Mais des valeurs plus basses pour la vie humaine tendent à être utilisées pour les pays en développement, puisque la méthodologie permettant de déterminer la valeur d'une "vie statistique" dépend de mesures monétaires telles que les revenus de la personne ou les méthodes contingentes d'évaluation. Etant donné que les impacts les plus sérieux du changement climatique auront lieu dans les pays en développement, cette distorsion sous-évalue la vie humaine dans ce type d'estimation économique et soulève des questions tant éthiques qu'analytiques.

³³ Nordhaus, 2013, p. 137.

³⁴ Nordhaus, 2013, p. 145.

De plus, ces estimations ne prennent pas en compte la possibilité de conséquences encore plus catastrophiques qui *pourraient* résulter d'une perturbation du climat bien pire que celles anticipées. L'ouragan Katrina d'Août 2005 par exemple, a causé 1800 décès ainsi que des dommages de 100 milliards de dollars. L'ouragan Sandy de 2012, a causé 50 milliards en dommages, entraînant des coupures de courant pour 5 millions de personnes et ayant des effets dévastateurs qui ont perduré sur une partie importante de la côte de New York et du New Jersey. Si le changement climatique est la cause d'une recrudescence d'ouragans de cette ampleur (tels que le Typhon Haiyan qui s'est abattu sur les Philippines en Novembre 2013), les estimations données dans le tableau 2 de moins d'un milliard de dollars de pertes annuelles pourraient être très sous-estimées. En Août et Septembre 2017, à l'heure où cet article est traduit, une série noire de trois ouragans plus dévastateurs les uns que les autres, Harvey, Irma et Maria, ont provoqué des dégâts considérables dans les Caraïbes (Iles de Saint-Martin et de Saint-Barthélemy, et Porto Rico) ainsi que dans les états du Texas et de la Floride. Les estimations provisoires donnent un total de 200 milliards de dollars de coûts pour l'ensemble des dommages provoqués par les ouragans en 2017 aux Etats-Unis³⁵. Une autre valeur inconnue – celle de la morbidité humaine, et des pertes par maladies – pourrait être extrêmement importante si les maladies tropicales s'étendent sur des aires géographiques beaucoup plus grandes, en raison des conditions climatiques plus chaudes.

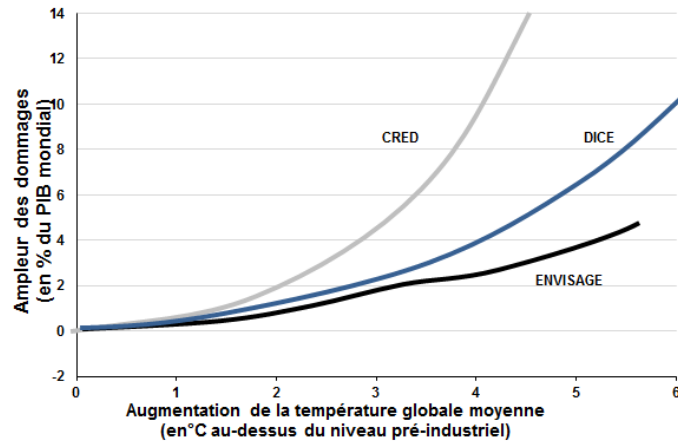
Les modèles d'évaluation intégrée ont été utilisés par les scientifiques et les économistes afin de traduire des scénarios de croissance de la population et de croissance économique ainsi que des émissions qui leur sont associées, en termes de composition atmosphérique et de température globale moyenne. Ces modèles appliquent des « fonctions de dommages » qui donnent des approximations des relations entre changement de température et coûts économiques d'impacts tels que le changement du niveau des océans, de la fréquence des ouragans, sur la productivité agricole et les fonctions des écosystèmes. Enfin, ces modèles cherchent à traduire les dommages futurs en termes de valeur monétaire présente.³⁶

Si les températures évoluent vers les estimations les plus hautes, alors les ordres de grandeur des dommages à l'échelle globale seront considérablement plus élevés comme le montre la figure 13. Plusieurs modèles présentent un éventail d'estimations pour les dommages futurs et donc différents impacts en termes économiques, allant de 2% à 10% ou plus du PIB mondial par an, selon l'augmentation de la température globale moyenne. Les valeurs de la figure 13 montrent les résultats de trois modèles largement utilisés, et reposant sur des projections du GIEC sur les températures les plus probables à l'horizon 2100.

³⁵ <http://money.cnn.com/2017/09/28/news/economy/puerto-rico-hurricane-maria-damage-estimate/index.html>

³⁶ Revesz, Arrow et al., 2014.

Figure 13. Accroissement de l'ampleur des dommages en fonction de l'augmentation des températures moyennes globales selon trois modèles : CRED, DICE, ENVISAGE



Source: R. Revesz, K. Arrow et al., 2014. <http://www.nature.com/news/global-warming-improve-economic-models-of-climate-change-1.14991>

Note: Les trois modèles différents (ENVISAGE, DICE, and CRED) présentés dans cette figure donnent des estimations de dommages qui sont proches pour des niveaux bas à modéré d'augmentation des températures, mais qui divergent de façon significative pour des augmentations plus importantes, reflétant en cela des différences dans les hypothèses utilisées.

Il est clair que les estimations des dommages futurs ne couvrent pas tous les impacts potentiels, et donnent lieu à de nombreuses critiques. Mais supposons que nous décidions de les accepter – au moins à titre de référence, donnant des ordres de grandeurs plus ou moins acceptables. Nous devons alors peser les bénéfices estimés des politiques de prévention du changement climatique avec les coûts de ces politiques. Afin d'estimer ces coûts, les économistes utilisent des modèles montrant comment le Produit de l'Economie résulte d'intrants tels que le travail, le capital, et les ressources naturelles.

Afin de réduire les émissions de carbone, on doit diminuer l'usage des combustibles fossiles et leur substituer d'autres sources d'énergie qui pourront être plus coûteuses, et investir dans de nouvelles infrastructures en énergies renouvelables, en efficacité énergétique, et dans d'autres stratégies de réduction de l'empreinte en carbone. Les économistes calculent des **coûts marginaux de réduction** – c'est-à-dire les coûts de réduction d'une unité de carbone supplémentaire – pour une variété de mesures prises telles que l'efficacité énergétique, la transition vers le solaire et l'éolien, ou la déforestation évitée.

Certaines de ces mesures ont des coûts relativement faibles ou même négatifs (c'est-à-dire qu'elles apportent un gain économique net en plus de contribuer à la réduction de l'empreinte carbone). Mais en ce qui concerne les réductions les plus

importantes des émissions de carbone, la plupart des modèles économiques prédisent un impact négatif sur le PIB. Un bilan d'un large éventail d'études, appelé méta-analyse, montre que l'impact sur le PIB dépend des hypothèses faites sur la possibilité de substitution en direction de nouvelles sources d'énergie, sur l'adaptation technologique et sur la flexibilité économique.³⁷

Une estimation des coûts que représenterait la réalisation des objectifs de l'Accord de Paris, de rester en deçà d'une augmentation de la température de 2°C, seraient d'un ordre de grandeur de 1,5% du revenu mondial (c'est-à-dire l'équivalent d'une année de croissance du revenu réel). Mais cette estimation repose sur le meilleur des scénarios possibles, basé sur une coopération internationale efficace. Dans des scénarios moins favorables, on estime que les coûts peuvent s'élever à plus de 4% du PIB mondial.³⁸ La méta-analyse mentionnée plus haut présente aussi un éventail allant d'un coût de 3,4% du PIB mondial dans le pire des cas à un *accroissement* du PIB mondial de 3,9% dans le meilleur des cas.³⁹

Si les coûts et bénéfices d'une politique volontariste de réduction du carbone s'élèvent à plusieurs points du PIB, comment peut-on comparer entre les mesures à prendre et décider en connaissance de cause ? Beaucoup dépend de notre évaluation aujourd'hui des **coûts et bénéfices futurs**. Les coûts de l'action doivent être supportés aujourd'hui ou dans un futur proche. Les bénéfices de l'action (les coûts évités de dommages futurs) ne seront ressentis que dans l'avenir. Notre tâche est donc de décider aujourd'hui comment équilibrer entre ces coûts actuels et ces bénéfices futurs.

Les économistes évaluent les coûts et bénéfices futurs au travers de l'utilisation d'un **taux d'actualisation**. Les coûts et bénéfices du futur ont une valeur monétaire inférieure aux coûts et bénéfices du présent, l'ampleur de la différence dépendant du choix du taux d'actualisation (voir encadré 4).

Les problèmes liés aux jugements de valeurs inhérents à ce choix viennent s'ajouter aux questions d'éthique et de jugements de valeurs dont nous avons parlé plus haut, concernant l'estimation des coûts et bénéfices. Peut-on vraiment dire que les dommages causés aux générations futures devraient peser moins lourd dans la décision que les mêmes dommages ressentis aujourd'hui ? Ceci implique que l'on doive considérer des approches alternatives – incluant des techniques qui peuvent incorporer les coûts et bénéfices écologiques autant qu'économiques.

Les études économiques traitant de l'analyse coût-bénéfice du changement climatique ont abouti à des conclusions très différentes en termes de politiques. Les études les plus anciennes (de 2000 à 2008) de William Nordhaus et ses collègues,

³⁷ Stern, 2007, Chapter 10, "Macroeconomic Models of Costs".

³⁸ Nordhaus, 2013, Chapter 15, "The Costs of Slowing Global Climate Change".

³⁹ Stern, 2007, p.271.

estimaient que des politiques économiques « optimales » visant à ralentir le changement climatique, pourraient reposer sur des réductions modestes des taux d'émissions dans le court terme, suivies par des augmentations de réductions dans le moyen et long terme, une approche que l'on a appelée politique climatique graduelle par paliers.⁴⁰

La plupart des premières études économiques sur ce sujet ont conclu comme celle de Nordhaus, bien que quelques-unes d'entre elles aient, dès le début, recommandé des actions plus drastiques. Le débat a pris un tournant décisif quand, en 2007, Nicholas Stern, un ancien économiste en chef de la Banque Mondiale, fit paraître un rapport de 700 pages, commandé par le gouvernement britannique, le "Stern Review on the Economics of Climate Change."⁴¹ Alors que la plupart des analyses économiques précédentes du changement climatique suggéraient des réponses politiques relativement modestes, la Stern Review recommandait fortement de prendre des mesures substantielles et immédiates :

« Les preuves scientifiques sont désormais irréfutables: le changement climatique est une menace mondiale grave qui demande une réponse mondiale urgente. Cette étude dresse un bilan de tous les impacts possibles du changement climatique et de leurs coûts économiques, en utilisant un grand nombre de techniques d'évaluation des coûts et des risques. A partir de l'ensemble de ces perspectives et projections, une évidence émerge de tous les calculs opérés, qui nous conduit à cette conclusion claire et nette : les bénéfices d'une action forte et prise le plus tôt possible dépassent de beaucoup tous les coûts à venir qu'engendreraient l'inaction. »

En utilisant les résultats de modèles économiques formels, la Stern Review estime que si l'on n'agit pas, l'ensemble des coûts et des risques du changement climatique seront équivalent à une perte d'au moins 5 pourcents du PIB mondial chaque année, à partir de maintenant et à perpétuité. Si l'on prend en considération un éventail plus large de risques et d'impacts, l'estimation des dommages pourrait atteindre 20 pourcents du PIB ou davantage. Au contraire, les coûts de l'action – la réduction des émissions de gaz à effet de serre afin d'éviter les pires des impacts du changement climatique – peuvent se limiter à environ 1 pourcent du PIB mondial chaque année.⁴² Ce ratio bénéfice/coût d'au moins 5/1 justifie l'argument économique qu'une action politique majeure et immédiate s'impose, à l'opposé de politiques graduelles et par paliers.

⁴⁰ Nordhaus 2007, 2008; Nordhaus and Boyer, 2000.

⁴¹ Stern, 2007. The Stern Review on the Economics of Climate Change, consultable à : http://nordhaus.econ.yale.edu/stern_050307.pdf

⁴² Stern, 2007, Short Executive Summary, vi.

Pourquoi existe-t-il une si grande différence entre ces deux approches de l'analyse économique du changement climatique ? Une des différences majeures provient du choix du taux d'actualisation appliqué à l'évaluation des coûts et bénéfices futurs.

La valeur actuelle (VA) d'un flux de bénéfices ou de coûts à venir, dans le long terme, dépend du taux d'actualisation. Un taux élevé conduira à une valeur actuelle faible pour des bénéfices qui surviendront dans le long terme, et à une valeur très élevée pour les coûts subis dans le court terme. A l'inverse, un taux d'actualisation faible pourra entraîner une évaluation actuelle plus élevée pour des bénéfices de long terme. La valeur actuelle nette estimée pour une politique agressive de réduction de l'effet de serre sera donc plus élevée si l'on choisit un taux d'actualisation faible (voir encadré 4).

Alors que les études de Stern et de Nordhaus utilisent dans les deux cas une méthodologie économique standard, l'approche de Stern donne un poids plus grand aux effets écologiques de long terme. Le rapport Stern utilise un taux d'actualisation faible de 1,4% pour comparer les coûts présents et futurs. Ainsi, bien que les coûts d'une action agressive semblent plus élevés que les bénéfices pendant plusieurs décennies, le potentiel important de dommages de long terme fait pencher la balance en faveur d'une action agressive aujourd'hui. Les impacts de ces dommages seront à la fois monétaires et non monétaires. Dans le long terme, les dommages faits à l'environnement par le changement climatique mondial auront des effets négatifs très marqués également pour l'économie. Mais l'utilisation d'un taux standard d'actualisation de 5 à 10% aura l'effet de réduire jusqu'à en être quasi négligeable la valeur actuelle de dommages futurs de très grande ampleur.

Une autre différence entre les deux études relève de la manière dont elles traitent de l'incertitude. L'approche de Stern donne un bien plus grand poids à des impacts incertains mais potentiellement catastrophiques. Cela reflète une application du **principe de précaution** : si un évènement peut s'avérer catastrophique, même si la probabilité qu'il survienne semble très faible, on doit prendre toutes les mesures possibles pour l'empêcher de se produire. Ce principe, que l'on applique désormais très largement dans la gestion des risques écologiques, est d'une importance toute particulière pour le changement climatique mondial en raison des nombreux résultats inconnus mais potentiellement désastreux qui pourraient être associés à une accumulation continue de gaz à effet de serre (voir encadré 5).

ENCADRE 4: L'ACTUALISATION

Les économistes calculent la valeur présente d'un coût ou bénéfice qui aura lieu dans l'avenir (dans n années) en "actualisant" ces sommes utilisant l'équation suivante :

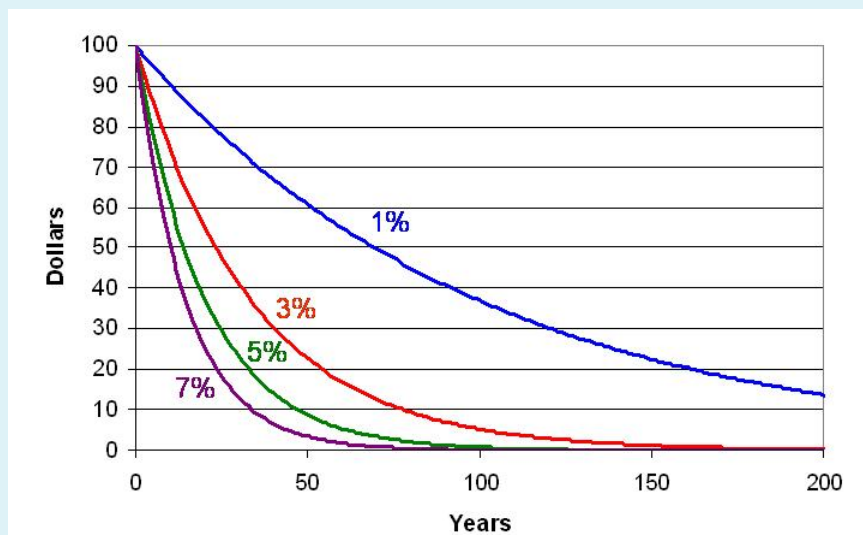
$$\text{Valeur actuelle} = \$X / (1 + r)^n$$

Où X est la valeur future, r le taux d'actualisation et n le nombre d'années. Ainsi, par exemple, si l'on veut déterminer la valeur présente d'un bénéfice de \$50.000 qui sera reçu dans 25 ans, avec un taux d'actualisation de 5%, cette valeur est :

$$\$50,000 / (1 + 0.05)^{25} = \$14,765$$

Le choix du taux d'actualisation devient encore plus important plus on s'éloigne dans le temps. La figure 14 ci-dessous montre la valeur présente de \$100 pour des coûts et des bénéfices rencontrés à des périodes différentes à venir, en choisissant plusieurs taux d'actualisation différents, qui ont été utilisés dans plusieurs analyses coût-bénéfice relatives au changement climatique. Comme on peut le voir, les coûts ou bénéfices qui surviendront dans 100 ans ont une valeur actuelle négligeable avec des taux d'actualisation de 5 % ou 7% (relativement \$0.76 et \$0. 12). Même avec un taux d'actualisation de 3%, la valeur de \$100 dans 100 ans n'est aujourd'hui que de \$5.20. Mais quand le taux d'actualisation est de 1%, les impacts dans 100 ans sont considérés comme significatifs aujourd'hui (\$100 dans 100 ans représenteraient \$37 actuellement – et même sur une période de 200 ans, la valeur présente de \$100 dans 200 ans serait presque de \$20). Plus le taux d'actualisation est faible, plus on accorde aujourd'hui de valeur à l'avenir et plus les décisions actuelles prendront en compte ce qui se passera dans plusieurs décennies. A l'inverse, plus le taux d'actualisation est élevé, moins on tiendra compte aujourd'hui de ce qui peut se passer dans un futur lointain.

Figure 14. Valeur actuelle d'un coût ou bénéfice futur de \$100
Les effets des différents taux d'actualisation



ENCADRÉ 5: POINTS DE BASCULEMENT DU CLIMAT, BIFURCATIONS SOUDAINES ET IRREVERSIBLES

L'incertitude des projections relatives au changement climatique provient de la question des boucles rétroactives. Une boucle rétroactive se produit lorsqu'un changement initial, tel que des températures plus élevées, produit à son tour des changements dans les processus physiques qui amplifient ou diminuent l'effet initial (une réponse qui accroît l'effet original est appelée boucle rétroactive 'positive' ; une réponse qui le réduit est appelée boucle rétroactive 'négative'). Un exemple de boucle rétroactive positive serait l'hypothèse où le réchauffement produirait une fonte de la toundra arctique, relâchant carbone dioxyde et méthane dans des proportions telles que l'accumulation de ces gaz à effet de serre dans l'atmosphère accélérerait le processus du réchauffement climatique.

Un des résultats des diverses boucles rétroactives associées au changement climatique montre que le réchauffement s'opère plus rapidement que la plupart des scientifiques ne l'avaient prédit il y a seulement 5 à 10 ans. Ceci conduit à des inquiétudes accrues concernant l'existence de boucles rétroactives positives « fulgurantes » qui pourraient produire des changements dramatiques sur une très courte durée. Certains scientifiques mettent en garde que l'on s'approche de certains points irréversibles de basculement climatique qui, une fois dépassés, ont le potentiel de déclencher des effets catastrophiques.

Sans doute l'hypothèse la plus alarmante serait la possibilité d'un effondrement rapide du Groenland et de la calotte glacière de l'Antarctique Occidental. Alors que le GIEC a prévu une montée du niveau des océans de 0.2 à 0.6 mètres à l'horizon 2100, la fonte de ces deux masses de glace aurait pour conséquence une montée du niveau des océans de 12 mètres ou plus. Ce scénario donne encore lieu à controverse, et est considéré comme improbable au cours du 21ème siècle, mais de nouvelles recherches montrent que des changements peuvent survenir beaucoup plus rapidement qu'on ne s'y attendait.

Dans des études récentes, des scientifiques ont trouvé que les émissions de méthane provenant de l'Arctique se sont élevées de près d'un tiers en seulement cinq ans. La découverte fait suite à une série d'observations provenant de cette région et montrant que récemment des sols jusque-là gelés sont en train de fondre et de relâcher du méthane en plus grandes quantités. Ces sols arctiques emprisonnent pour le moment des milliards de tonnes de méthane, un gaz à effet de serre beaucoup plus puissant que le dioxyde de carbone, ce qui conduit nombre de scientifiques de grand renom à considérer le dégel du permafrost comme une bombe à retardement qui pourrait dépasser de loin tous les efforts de contrôle du changement climatique. Ils craignent que le réchauffement causé par l'accroissement des émissions de méthane puisse être lui-même responsable d'un relâchement de méthane encore supérieur, enfermant la région dans une spirale destructive faisant s'accroître les températures à un rythme plus élevé que prévu.

Sources: David Adam, "Arctic permafrost leaking methane at record levels, figures show", *The Guardian*, 2010, consultable à : www.guardian.co.uk/environment/2010/jan/14/arctic-permafrost-methane/
Justin Gillis, "Scientists warn of perilous climate shifts within decades, not centuries," *New York Times*, March 22, 2016; DeConto and Pollard, 2016.

Une étude effectuée par Martin Weitzman considère que les possibilités de catastrophes causées par le changement climatique entraîneraient des coûts très largement supérieurs à tout ce que les calculs d'actualisation peuvent estimer, et qu'en conséquence il est nécessaire d'investir de manière massive dans la prévention afin d'éviter la possibilité de désastres futurs - selon un principe semblable à celui de l'assurance de sa maison contre le risque d'incendie.⁴³

Une troisième différence entre ces études concerne l'évaluation des coûts économiques des actions visant à réduire le changement climatique. Les mesures prises pour empêcher le changement climatique auront des effets économiques sur le PIB, la consommation, et l'emploi, ce qui explique pourquoi les gouvernements sont réticents à prendre des mesures drastiques pour réduire de manière conséquente les émissions de CO₂. Mais ces effets sur l'économie ne seront pas tous négatifs.

L'étude de Stern a passé en revue tous les modèles économiques des coûts de réduction du carbone. Les estimations de ces coûts dépendent beaucoup des hypothèses retenues pour la modélisation. Une stabilisation atmosphérique des accumulations de CO₂ à 450 parties par million donne des estimations de coûts variant d'une diminution du PIB de 3,4% à une *augmentation* du PIB de 3,9%.

Le résultat dépend d'un grand nombre d'hypothèses, en particulier :

- L'efficacité ou l'inefficacité des réponses économiques aux signaux des prix de l'énergie
- La disponibilité ou non de technologies énergétiques de substitution sans carbone – technologies appelées “**backstop**”
- Le fait que les nations peuvent ou non mettre en œuvre des **options de moindre-coût** pour la réduction du carbone
- Le fait que les revenus générés par les taxes sur les combustibles fossiles soient ou non utilisés pour baisser d'autres impôts
- Le fait que les bénéfices externes de la réduction du carbone, y compris la réduction des niveaux de pollution de l'air, soient ou non pris en compte.⁴⁴

Selon les hypothèses faites, les politiques de réduction des émissions pourraient varier d'une approche minimaliste d'une réduction faible du taux d'accroissement des émissions, à une réduction drastique des émissions de CO₂ entre 50 et 80%.

Les positions de Nordhaus et de Stern sont en train de converger depuis quelques années. Nordhaus, dans ses publications les plus récentes, utilise une version nouvelle de son modèle (DICE-2013) qui donne des projections d'augmentation de la température de 3°C ou plus à l'horizon 2100. Il recommande une taxe carbone de

⁴³ Weitzman, 2009

⁴⁴ Stern Review, Chapter 10: “Macroeconomic Models of Costs”.

\$21 par tonne de CO₂ émise, avec une augmentation rapide de cette taxe. Une modification de son modèle a été proposée par Simon Dietz et Nicholas Stern, qui prennent en compte des dommages beaucoup plus graves et en particulier la possibilité de bifurcations irréversibles (voir encadré 5), et qui recommandent que la taxe carbone soit de deux à sept fois plus importante afin de limiter l'accumulation atmosphérique de CO₂ à 425-500 ppm et l'augmentation des températures à moins de 2.0°C.⁴⁵ Bien qu'il y ait encore des différences entre les deux économistes, la tendance est à la recommandation de politiques beaucoup plus drastiques:

« Bien que les opinions de Nordhaus et de Stern diffèrent quant à la nature de la taxe carbone, suivant une graduation par palier ou bien une pente abrupte, et quant à la valeur adéquate du taux d'actualisation à utiliser pour convertir en valeur présente les dommages futurs à anticiper, ce débat est de plus en plus consensuel. Tous deux sont en effet désormais d'accord sur le fait que la pente de ce palier sera plus raide au fur et à mesure que l'on délaie l'adoption de cette taxe. La sophistication croissante des modèles qu'ils utilisent pointe également vers la nécessité d'une action de plus en plus forte. »⁴⁶

Changement climatique et inégalités

Les effets du changement climatique se feront surtout sentir sur les populations les plus pauvres du monde. L'Afrique en particulier sera durement touchée et connaîtra une plus grande rareté de ses ressources en eau ce qui affectera sa production alimentaire ; l'Asie du Sud et du Sud-Est sera par ailleurs beaucoup plus vulnérable aux inondations qui se produiront avec une plus grande fréquence. En Amérique du Sud, les zones tropicales connaîtront des dommages importants dans les secteurs agricoles et de sylviculture en raison d'un climat plus sec. Les rythmes de précipitations seront altérés et les glaciers des Andes disparaîtront progressivement, ces deux phénomènes contribuant à une plus grande rareté des ressources en eau.⁴⁷ Alors que les pays riches ont les ressources pour s'adapter aux nombreux effets du changement climatique, les pays pauvres ne seront pas capables de mettre en œuvre les mesures préventives, surtout celles qui demandent les technologies les plus sophistiquées.

Des études plus récentes ont utilisé des modèles donnant la distribution géographique des impacts afin d'estimer les conséquences régionales du changement climatique.

⁴⁵ Dietz and Stern, 2014.

⁴⁶ Komanoff, 2014.

⁴⁷ IPCC, 2007b; Stern, 2007, Chapter 4: Implications of Climate Change for Development

Comme l'indique le tableau 2, le nombre de victimes d'inondations côtières et le nombre de personnes en situation de disette ou de famine à l'horizon 2080 sera relativement plus important en Afrique, en Amérique Latine et en Asie, où se trouvent la plupart des pays en développement.⁴⁸

Une étude publiée dans Nature prédit que :

« Si les sociétés continuent de fonctionner comme elles le font depuis quelques décennies, le changement climatique est en passe de transformer l'économie globale en réduisant de manière significative la production économique mondiale et en amplifiant les inégalités économiques globales, par rapport à un monde sans changement climatique. Les adaptations opérées grâce à l'innovation et aux investissements pourront réduire certains de ces effets mais des conflits sociaux et un commerce mondial perturbé pourraient les exacerber. »⁴⁹

D'une manière générale, l'étude donne à "la probabilité de pertes globales de grande envergure" un risque d'être substantiel, la majeure partie de ces pertes étant portées par les pays les plus pauvres.

Tableau 2 – Impacts d'échelle régionale du changement climatique à l'horizon 2080 (en millions de personnes)

Région	Population vivant avec une rareté croissante des ressources en eau	Augmentation annuelle moyenne du nombre de victimes d'inondations côtières	Population supplémentaire courant un risque de disette ou famine*
Europe	382–493	0.3	0
Asie	892–1197	14.7	266 (–21)
Amérique du Nord	110–145	0.1	0
Amérique du Sud	430–469	0.4	85 (–4)
Afrique	691–909	12.8	200 (–2)

* Nombres entre parenthèses, voir note ci-dessous

Source: d'après le quatrième rapport du GIEC, 2007 (IPCC, 2007b), disponible à :

http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch20s20-6-2.html

Note : Ces estimations sont basées sur un scénario « business as usual ». Si l'on tient compte de l'effet d'accroissement maximal de la productivité des végétaux causé par la concentration plus élevée de CO₂ on obtient une diminution du nombre de la population courant le risque de disette ou de famine (cette réduction étant présentée par les nombres entre parenthèse dans la dernière colonne).

⁴⁸ Les données pour ces études sont présentées dans le site http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch20s20-6-2.html

⁴⁹ Burke, Hsiang and Miguel, 2015.

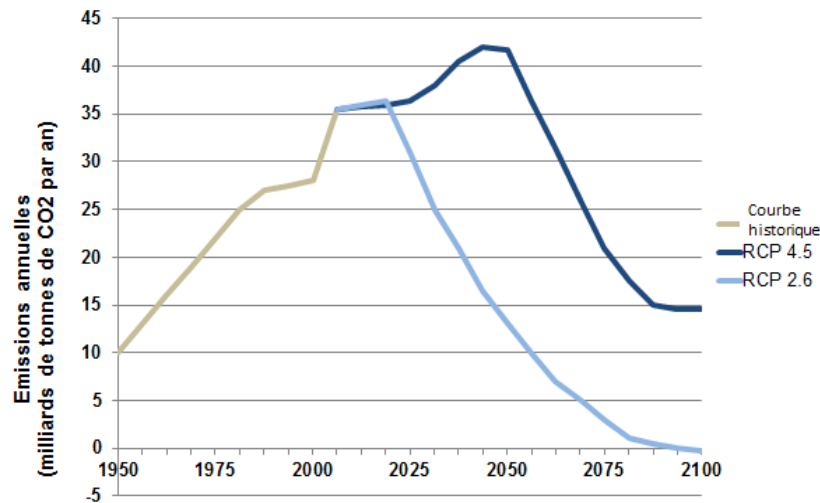
La façon dont les économistes rendent compte de l'inégalité dans leurs analyses peut avoir un impact significatif sur les recommandations politiques. Si tous les coûts sont évalués en dollars, une perte de 10% du PIB dans un pays pauvre représente probablement bien moins qu'une perte de 3% du PIB dans un pays riche. Donc les dommages causés par le changement climatique dans les pays pauvres, qui peuvent représenter un large pourcentage du PIB, auraient un poids relativement faible. Le rapport Stern insiste sur le fait que les effets disproportionnés du changement climatique sur les populations les plus pauvres du monde, devrait être pris en compte et augmenter encore davantage les coûts de ce changement. Stern estime que sans les effets de l'inégalité, les coûts d'un scénario « on ne fait rien et on attend venir » (ou scénario « business as usual ») seront de 11 à 14 % du PIB mondial. Si on donne plus de poids aux impacts sur les plus pauvres, l'estimation du coût est de 20% du PIB mondial.⁵⁰

Ainsi, les hypothèses faites sur la façon d'évaluer les coûts et bénéfices sociaux et environnementaux peuvent avoir de grandes différences sur les recommandations politiques. Comme on l'a vu, les analyses coûts-bénéfices recommandent toutes que des politiques de mitigation soient mises en œuvre mais elles diffèrent dans l'ampleur de ces politiques, selon les hypothèses retenues en terme de risque et d'actualisation. Un économiste plus orienté vers l'écologie considérera que la question fondamentale est celle de la stabilité des systèmes physiques et écologiques qui règlent les grands équilibres planétaires et contrôlent le climat. L'objectif de **stabilisation du climat** sera donc l'objectif pour cet économiste, et non pas l'optimisation des coûts et des bénéfices économiques.

La stabilisation des *émissions* de gaz à effet de serre est insuffisante. Au taux actuel d'émissions, le dioxyde de carbone et les autres gaz à effet de serre continueront de s'accumuler dans l'atmosphère. La stabilisation du niveau d'*accumulation* des gaz à effet de serre impliquera une chute significative des émissions bien en dessous des niveaux actuels. La figure 15 montre les estimations faites par le GIEC des réductions nécessaires des émissions de CO₂ afin d'atteindre un niveau de stabilisation à 430-480 ppm, ou un niveau à 530-580 ppm dans l'atmosphère. Pour le niveau le plus bas et le plus ambitieux, il est important de noter que les émissions doivent tomber à un niveau quasi nul dans la seconde partie du siècle. Cela ne peut se réaliser qu'avec non seulement des coupes drastiques dans les émissions, mais aussi un taux d'absorption de CO₂ beaucoup plus élevé qu'à présent, notamment au travers d'une reforestation massive, et d'une redirection des méthodes agricoles vers des modèles de régénération des sols permettant de fixer davantage le carbone.

⁵⁰ Stern, 2007, Ch. 6.

Figure 15 : Scénarios de Stabilisation du Carbone: Réduction Nécessaire des Emissions



Source: IPCC (GIEC), 2014d, p. 11.

Note: La courbe supérieure représente le scénario du GIEC, RCP 4.5 (stabilisation modérée, atteignant un niveau de l'ordre de 530 à 580 ppm d'accumulation de CO₂)

Il est clair que des réductions de cet ordre imposent à l'économie mondiale de changer de manière radicale la manière dont elle utilise l'énergie. L'efficacité énergétique et l'utilisation des énergies renouvelables pourront avoir un impact significatif sur la réduction des émissions. D'autres politiques pourront réduire les émissions d'autres gaz à effet de serre et promouvoir l'absorption de CO₂ par les forêts et les sols. Quelles politiques peuvent-elles fournir une réponse adéquate et suffisante, et comment les pays du monde ont-ils réagi à ce défi jusqu'à présent ? C'est ce que nous allons maintenant analyser plus en détail.

3. REPONSES POLITIQUES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Adaptation et Mitigation

Deux types de mesures peuvent être utilisées pour s'attaquer au changement climatique : des mesures **préventives ou de mitigation** qui tendent à diminuer ou annuler l'effet de serre ; **des mesures adaptatives** qui traitent des conséquences de l'effet de serre et tentent d'en amoindrir son impact.

Les mesures adaptatives comprennent:

- La construction de barrages et digues pour protéger le littoral contre la montée des eaux des océans ainsi que contre des événements climatiques extrêmes tels qu'inondations et ouragans.
- La transition des méthodes agricoles vers des modèles adaptés au changement des conditions climatiques.
- L'éloignement des populations du littoral et leur relocalisation à l'intérieur des terres.
- La création d'institutions qui peuvent mobiliser les ressources nécessaires, humaines, matérielles et financières afin de répondre aux désastres liés au changement climatique.

Les mesures préventives comprennent :

- La réduction des émissions de gaz à effet de serre, par une transition vers des sources d'énergie à empreinte carbone plus basse ou nulle (par exemple en passant du charbon au gaz naturel pour la production d'électricité, ou mieux, à des énergies renouvelables telles que le solaire et l'éolien).
- La réduction des émissions de gaz à effet de serre par des économies d'énergie et des gains en efficacité énergétique.
- L'accroissement des **puits de carbone**.⁵¹ Les puits de carbones se composent de tous les éléments naturels qui fixent et stockent le carbone, comme les plantes, et en particulier les forêts, ainsi que les sols. Les interventions humaines peuvent soit réduire ou étendre les puits de carbone, au travers des modèles de gestion des forêts ou de pratiques agricoles. Les forêts recyclent du dioxyde de carbone (CO₂) en oxygène. Préserver les aires forestières et promouvoir la reforestation peut avoir un effet significatif sur les émissions nettes de CO₂. Les sols représentent un vaste réservoir de carbone, dans lequel est stocké trois fois plus de carbone que dans l'atmosphère. La régénération des sols dégradés permettrait de re-capturer de très larges quantités de CO₂.

⁵¹ Les puits de carbone sont des zones où les excès de carbone peuvent être stockés. Les océans et les forêts comptent parmi les puits de carbone naturels. L'intervention humaine peut réduire ou augmenter la capacité de ces puits à capter le carbone, au travers de la gestion des ressources forestières ou des pratiques agricoles.

Pour toute mesure préventive ou adaptative, une approche économique requiert l'application d'une **analyse coût-efficacité** lorsque l'on considère les politiques à adopter.

L'usage de l'analyse coût-efficacité évite la plupart des controverses associées à l'analyse coût-bénéfice. Alors que l'analyse coût-bénéfice tente d'offrir un outil d'aide à la décision pour déterminer si une politique devrait ou non être appliquée, l'analyse coût-efficacité accepte d'emblée l'objectif que la société s'est fixé, et utilise des techniques économiques afin d'évaluer la manière la plus efficace d'atteindre cet objectif.

En général, les économistes préfèrent les approches qui utilisent les mécanismes de marché pour parvenir à leurs fins.

Les approches basées sur le marché sont censées être efficaces en termes de coût – plutôt que de chercher à contrôler les acteurs du marché directement, elles transforment les incitations des acteurs et des entreprises de sorte qu'ils changent de comportement et tiennent compte des coûts et des bénéfices externes. Les outils des politiques basés sur la régulation par les marchés comprennent les **taxes sur les pollutions** et les **permis à polluer**, qui font l'objet de transactions et de transferts. Ces deux sortes d'outils sont utiles dans la réduction des gaz à effets de serre. D'autres politiques économiques pertinentes comportent des mesures permettant de créer des incitations pour l'adoption de sources d'énergies renouvelables et de technologies efficaces en termes de consommation d'énergie.

Alors que ce module se concentre surtout sur les politiques préventives ou de mitigation, il semble de plus en plus évident que ces politiques ne seront pas suffisantes et qu'elles devront être accompagnées de mesures d'adaptation. Le changement climatique a déjà lieu et même si des politiques significatives de mitigation sont mises en œuvre dans l'immédiat, cela n'empêchera pas le niveau des océans de s'élever pour des décennies et des siècles à venir⁵². L'urgence des mesures à prendre varie selon les régions du monde. Ce sont les plus pauvres qui font face aux plus grandes menaces et ont le besoin le plus urgents de s'y adapter, sans en avoir les moyens financiers.

Les impacts les plus dévastateurs du changement climatique auront lieu dans les pays en développement, du fait de leur situation géographique et de leurs conditions climatiques, de leur haute dépendance aux ressources naturelles et de leur capacité très limitée à s'adapter au changement climatique. Parmi ces pays, les plus pauvres, ayant le moins de capacités à s'adapter, sont les plus vulnérables.⁵³

⁵² IPCC, 2007, p. 46; IPCC, 2014b *Summary for Policymakers*, p. 16; Kahn, 2016.

⁵³ African Development Bank et al., 2003, p. 1.

Le GIEC a identifié les besoins en adaptation par grands secteurs, comme le montre le tableau 3 - le secteur de l'eau, l'agriculture, les infrastructures, la santé humaine, les transports, l'énergie et les écosystèmes.⁵⁴

Le changement climatique entraînera de plus grandes précipitations dans certaines zones, en particulier dans les latitudes élevées, comme en Alaska, au Canada et en Russie, mais fera diminuer les précipitations dans d'autres zones telles que l'Amérique Centrale, l'Afrique du Nord, et l'Europe du Sud. Une réduction de la couverture neigeuse des grands massifs montagneux et de leurs glaciers pourrait menacer les ressources en eau pour plus d'un milliard de personnes, surtout en Inde (Himalaya) et dans certaines parties de l'Amérique du Sud. La nécessité de fournir suffisamment d'eau potable aux populations de ces régions pourrait conduire à la construction de nouveaux barrages et à des infrastructures améliorant l'efficacité de l'utilisation de l'eau, ainsi que d'autres stratégies d'adaptation.

Les changements dans les régimes de précipitations ainsi que dans les températures ont des conséquences importantes pour l'agriculture. On peut s'attendre à ce que les récoltes augmentent dans certaines régions froides, y compris certaines régions de l'Amérique du Nord, mais d'une manière générale, on estime que l'impact sur l'agriculture mondiale sera négatif, et de plus en plus négatif au fur et à mesure que le climat se réchauffera. Aux Etats-Unis, les impacts du changement climatique sont en train d'empirer et les périodes de sécheresse dans les Etats de l'Ouest s'allongent, en particulier en Californie, ce qui conduit les agriculteurs à adopter des cultures moins consommatrices d'eau, remplaçant les vergers d'orangers et d'avocats par des grenadiers et des dragon-fruits.⁵⁵ On s'attend à ce que les impacts dans l'agriculture soient les plus graves en Afrique et en Asie. Il est nécessaire de développer davantage de recherche afin d'anticiper les conditions de sécheresse à venir et de s'y adapter en modifiant le type de culture. L'Agriculture devra sans doute être abandonnée dans certaines régions mais pourra être étendue dans d'autres.⁵⁶

Les impacts du changement climatique sur la santé humaine se font déjà sentir. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a estimé qu'environ 140000 personnes par an meurent d'une conséquence directe du changement climatique, principalement en Afrique et dans le Sud Est asiatique.⁵⁷ L'OMS estime qu'après 2030, le changement climatique résultera en 250000 morts additionnelles par an, causées par la malnutrition, la malaria, la diarrhée, et la chaleur. L'OMS estime que les coûts directs en termes de santé s'élèveront à 2 à 4 milliards de dollars par an en 2030. Les recommandations politiques de l'OMS comprennent le renforcement des

⁵⁴ IPCC, 2007.

⁵⁵ <http://www.npr.org/sections/thesalt/2015/07/28/426886645/squeezed-by-drought-california-farmers-switch-to-less-thirsty-crops>.

⁵⁶ Cline, 2007; U. S. Global Change Research Program, 2009, Agriculture Chapter; Kahsay and Hansen, 2016..

⁵⁷ World Health Organization, 2009

systèmes de santé publique, y compris une meilleure éducation, la surveillance des maladies, la vaccination, et la capacité de réaction aux crises.⁵⁸

Tableau 3. Nécessité d'adaptation au changement climatique, par secteur

Secteur	Stratégies d'adaptation
Eau	Accroître les capacités de stockage de l'eau douce et de désalinisation. Améliorer la gestion des bassins hydrologiques. Accroître l'efficacité de l'usage de l'eau dans l'agriculture et réutiliser les eaux usées. Améliorer la gestion de l'eau en milieux urbain et rural.
Agriculture	Adapter l'emplacement des cultures et les dates de la saison de plantation aux nouvelles conditions climatiques. Développer des cultures mieux adaptées aux conditions plus sèches et aux températures plus élevées. Améliorer la gestion des terres face aux risques de sécheresse ou d'inondations. Renforcer les savoirs faire et les pratiques agricoles traditionnels et des peuples autochtones.
Infrastructures	Relocaliser les communautés les plus vulnérables au changement climatique. Construire et renforcer des digues et autres barrières contre la montée des eaux. Créer et restaurer des zones marécageuses afin de mieux contrôler les inondations. Renforcer les dunes sur le littoral.
Santé Publique	Programmes d'urgence pour faire face aux chaleurs extrêmes. Systèmes de surveillance permettant de repérer les premiers signes de maladies liées à la chaleur. Etre prêt à faire face aux menaces sur l'approvisionnement en eau potable. Etendre à tous les services de santé publique de bases.
Transports	Relocalisation ou adaptation des infrastructures de transport. Nouveaux standards et nouveaux types de transports permettant de faire face au changement climatique.
Énergie	Renforcer l'infrastructure de distribution d'énergie et d'électricité. Faire face à la demande accrue en climatisation. Accroître l'efficacité énergétique, et l'utilisation des énergies renouvelables.

⁵⁸ World Health Organization, Organisation Mondiale de la Santé 2009; WHO, *Climate Change and Health*, June 2016, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs266/en/>

Écosystèmes	Réduire les autres causes de pression sur les écosystèmes tels que la surexploitation pour les usages humains. Améliorer les connaissances scientifiques, et les méthodes de surveillance des risques. Réduire la déforestation, accroître la reforestation. Régénérer et étendre les mangroves, les barrières de corail, et les prairies sous-marines d'algues.
--------------------	--

Source: IPCC, 2007; IPCC, 2014c.

Des estimations diverses existent sur les coûts des mesures d'adaptation qui seraient appropriées. Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) estime que le coût de l'adaptation pour les pays en développement pourrait s'élever de 140 à 300 milliards de dollars par an, à partir de 2030, et de 280 à 500 milliards par an à l'horizon de 2050. Ces sommes sont significativement plus élevées que les 100 milliards de dollars par an qui ont été promis par les pays développés à la signature de l'Accord de Paris, en 2015. Le PNUE prévient qu'il y aura un fossé financier important et qui "va probablement s'élargir dans les décennies à venir, à moins qu'il y ait des progrès significatifs permettant d'assurer de nouvelles formes plus innovantes de financement de l'adaptation". Les coûts de l'adaptation sont déjà deux à trois fois supérieurs aux sommes publiques internationales réservées actuellement pour les couvrir.⁵⁹

Mesures Préventives de Mitigation du Changement Climatique: les options économiques

L'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère est un exemple clair d'une externalité négative qui impose des coûts significatifs à une échelle mondiale. Dans le langage de la théorie économique, le marché actuel pour les combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, prend en considération seulement les coûts et bénéfices privés, ce qui conduit à un équilibre de marché qui ne correspond pas à l'optimum social. D'un point de vue social, le prix de marché des combustibles fossiles est trop bas et la quantité consommée est trop élevée.

Les taxes carbone

Un remède économique standard pour l'internalisation des coûts externes consiste en un impôt par unité de polluant. Dans ce cas, il s'agit d'une **taxe carbone**, levée exclusivement sur les combustibles fossiles dans la proportion de carbone associée à leur production et à leur utilisation. Une telle taxe élèverait le prix des sources d'énergie basée sur le carbone, et donnerait ainsi aux consommateurs les incitations à conserver l'énergie ainsi qu'à reporter leur demande sur des sources

⁵⁹ UNEP (PNUE), 2016.

d'énergie alternatives et non basées sur le carbone (qui ne seraient pas taxées). La demande peut également se déplacer des combustibles à forte teneur en carbone telles que le charbon à d'autres combustibles fossiles qui ont un impact en émission de CO₂ relativement plus faible comme le gaz naturel.

En termes économiques, le niveau d'une telle taxe devrait être calculé à partir des coûts sociaux du carbone – une estimation de l'impact financier sur la société des émissions de carbone. L'Agence de l'Environnement des Etats-Unis (EPA) estime que le coût social du carbone, d'après plusieurs hypothèses variées, se situe entre 11 et 212 dollars, avec une médiane autour de \$50,57.⁶⁰ Comme nous l'avons soulevé plus haut, la raison principale du très large éventail entre ces valeurs repose dans le choix du taux d'actualisation et de l'estimation des risques et de l'incertitude qui leur est associée.

Le tableau 4 montre l'impact que des différents niveaux d'une taxe carbone auraient sur les prix du charbon, du pétrole et du gaz naturel. La taxe est présentée en dollars par tonne de CO₂. Une source assez commune d'erreur et de confusion vient du fait que ces valeurs sont exprimées tantôt en taxe par unité de carbone, tantôt en taxe par unité de CO₂. Afin de comparer les deux, il faut savoir que l'on doit tenir compte du ratio entre le poids moléculaire du CO₂ (44) et le poids moléculaire du carbone (12). Une tonne de Carbone est donc équivalente à $44/12 = 3.67$ tonnes de CO₂. Si l'on veut convertir une taxe de 100 dollars par tonne de Carbone en taxe par tonne de CO₂, il faut multiplier ces 100 dollars par $12/44 = 0,2727$: cela veut dire qu'une taxe de 100 dollars par tonne de Carbone est équivalente à une taxe de 27,27 dollars par tonne de CO₂.

Tableau 4. Taxes Carbone sur les combustibles fossiles: comparer deux options

Impact d'une taxe carbone sur le prix de l'essence à la pompe	
kg de CO ₂ par gallon	8.89
tonnes de CO ₂ par gallon	0.00889
taxe de \$50/t. de CO ₂ élève le prix du gallon de	\$0.44
taxe de \$100/t. de CO ₂ élève le prix du gallon de	\$0.88
Prix d'un gallon d'essence (2016)	\$2.20
Augmentation du prix en %, taxe \$50/t. de CO ₂	+20.2%
Augmentation du prix en %, taxe \$100/t. de CO ₂	+40.4%

⁶⁰ U.S. EPA, *The Social Cost of Carbon*, <https://www3.epa.gov/climatechange/EPAactivities/economics/scc.html>

Impact d'une taxe carbone sur le prix du charbon

kg de CO ₂ par tonne de charbon	2100
tonnes de CO ₂ par tonne de charbon	2.1
taxe de \$50/t. de CO ₂ élève le prix d'une tonne de charbon de	\$105
taxe de \$100/t. de CO ₂ élève le prix d'une tonne de charbon de	\$210
Prix d'une tonne de charbon (2016)	\$40
Augmentation du prix en %, taxe \$50/t. de CO ₂	+262.5%
Augmentation du prix en %, taxe \$100/t. de CO ₂	+525.0%

Impact d'une taxe carbone sur le prix du Gaz Naturel (méthane)

kg de CO ₂ par 1000 pieds-cubes	53.12
tonnes de CO ₂ par 1000 p.-cubes	0.05312
taxe de \$50/t. de CO ₂ élève le prix de 1000 p.-cubes de	\$2.66
taxe de \$100/t. de CO ₂ élève le prix de 1000 p.-cubes de	\$5.31
Prix de 1000 pieds cubes de gaz naturel (2016)	\$12
Augmentation du prix en %, taxe de \$50/tonne CO ₂	+22.1%
Augmentation du prix en %, taxe de \$100/tonne CO ₂	+44.2%

Source: Les émissions sont calculées à partir des coefficients carbones et de facteurs de conversions thermiques, disponibles sur le site du U.S. Department of Energy. Toutes les données relatives aux prix s'appliquent aux Etats-Unis et proviennent de la base de données du U.S. Energy Information Administration.

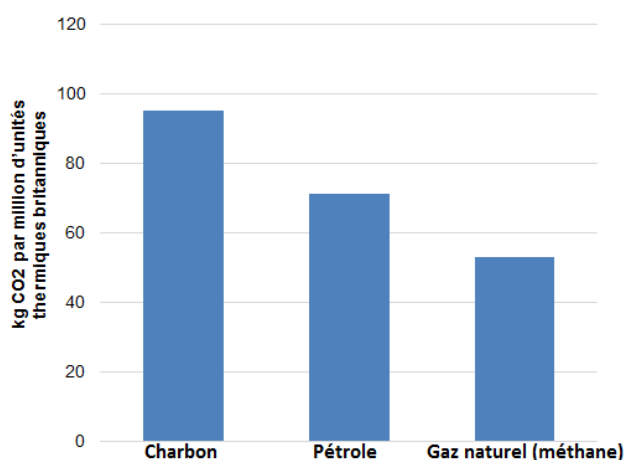
Note : Les unités sont celles qui sont utilisées aux Etats-Unis: l'essence est mesurée en gallons, le charbon en «short ton» et le gaz naturel en «cubic feet» ou pieds-cubes.

Si l'on considère le contenu en énergie, exprimé ici en Unités Thermiques Britanniques (British Thermal Units, ou Btus⁶¹), le charbon est le combustible fossile qui contient le plus de carbone par unité d'énergie produite, alors que le gaz naturel produit le moins d'émissions par Btu, comme le montre la figure 16. Si on calcule l'impact d'une taxe de carbone sur chaque unité commerciale de chacun des trois combustibles fossiles, on observe qu'une taxe carbone de \$50 par tonne de CO₂ par exemple, augmenterait le prix d'un gallon d'essence d'environ 44 cents, soit une augmentation des prix de 20% par rapport au prix de 2016 (Figure 17). Une taxe de

⁶¹ Un Btu (British thermal unit) correspond environ à la quantité d'énergie nécessaire pour élever la température d'une livre d'eau d'un degré Fahrenheit

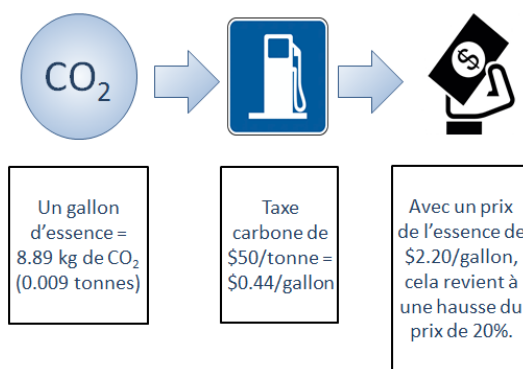
\$100 par tonne de CO₂ revient à une augmentation du prix de l'essence de 88 cents par gallon. L'impact serait encore plus important pour les prix du charbon – une taxe de \$50 par tonne de CO₂ augmenterait les prix du charbon par 262%, et une taxe de \$100 par tonne augmenterait ces prix par un facteur 5. Pour le gaz naturel, l'augmentation des prix est à peu près la même en pourcentage que pour l'essence. Pour le gaz naturel, bien que le contenu de carbone soit plus bas que pour l'essence, son prix relativement bas (en 2016) se traduit par le fait que l'impact en pourcentage de la taxe sur le prix est du même ordre de grandeur qu'il est pour l'essence

Figure 16. Contenu en Carbone des combustibles fossiles
(en kg de CO₂ par million de Btu)



Source : Calculé à partir des données du U.S. Department of Energy.

Figure 17. Impact d'une taxe carbone sur le prix de l'essence



Source: Calculé à partir des données du U.S. Department of Energy.

Ces taxes auront-elles un effet important sur les comportements des consommateurs, sur leur décision de conduire leur automobile ou de chauffer plus ou moins leur domicile ? Cela dépend de **l'élasticité de la demande** pour ces combustibles. L'élasticité de la demande est définie de la façon suivante:

Pourcentage de changement de la demande

Elasticité de la demande = -----

Pourcentage de changement du prix

Les économistes ont mesuré l'élasticité de la demande pour différents combustibles fossiles, en particulier l'essence. Une étude⁶² fait la synthèse de toutes les recherches disponibles sur l'élasticité de la demande pour les combustibles utilisés dans les moteurs. L'élasticité est en général négative puisqu'une augmentation dans le pourcentage d'un prix cause une baisse de la quantité demandée. Dans le court terme (environ un an ou moins) l'estimation de cette élasticité varie de -0,03 à -0,25.⁶³ Cela veut dire qu'une augmentation de 10% dans le prix de l'essence aurait pour conséquence attendue une diminution de la demande d'essence dans le court terme d'environ 0,3 à 2.5%.⁶⁴

Dans le long terme (environ 5 ans) la sensibilité de la réponse apportée aux augmentations des prix est plus importante car les gens ont eu le temps de s'ajuster en achetant des véhicules plus économes en essence et en changeant leurs habitudes de conducteur. L'élasticité de long terme de la demande pour les combustibles utilisés dans les moteurs est en moyenne de -0.64⁶⁵. Selon le tableau 4, une taxe de 50 dollars par tonne de CO₂ augmenterait le prix de l'essence d'environ 20 pourcents, ajoutant 44 cents par gallon au prix de l'essence, si l'on se base sur les prix de 2016. Une élasticité de long terme de -0,64 montre qu'une fois que les gens se sont ajustés à ce changement de prix, la demande pour l'essence devrait décliner d'environ 13%.

La Figure 18 montre la relation entre le prix de l'essence et la consommation par tête selon les pays. Puisque le coût de production d'un gallon d'essence varie peu d'un pays à l'autre, les variations du prix du gallon dans différents pays est presque uniquement fonction des différences de taxe. Notons que cette relation est semblable à celle de la courbe de demande : des prix élevés sont associés à une

⁶² Goodwin et al., 2004.

⁶³ Un article de 2006 par Jonathan E. Hughes, Christopher R. Knittel, et Daniel Sperling ("Evidence of a Shift in the Short-Run Price Elasticity of Gasoline Demand," NBER Working Paper No. W12530, September 2006) montre que l'élasticité de la demande d'essence dans le court terme semble avoir beaucoup diminué récemment. Ils estiment que l'élasticité de la demande pour la période 2001-2006 était de -0.03 à -0.08, alors que pour la période 1975-1980 l'élasticité de la demande était de -0.21 à -0.34.

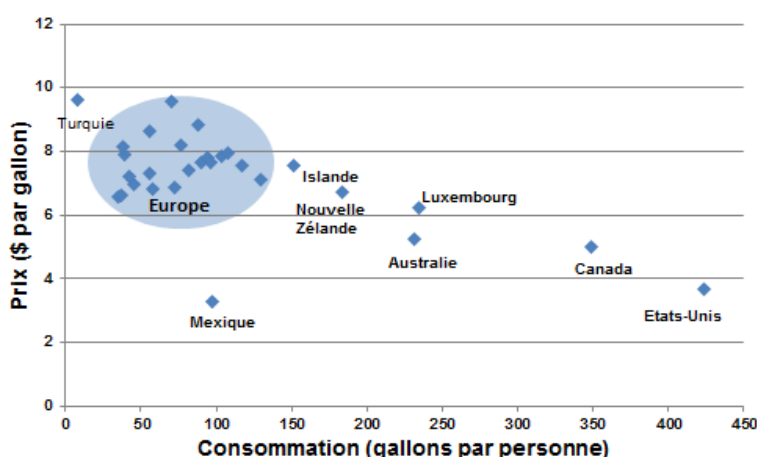
⁶⁴ Goodwin et al., 2004; Hughes et al., 2008.

⁶⁵ Goodwin et al., 2004.

faible consommation, des prix bas à une forte consommation. La relation ici mise en évidence n'est cependant pas la même que celle de la courbe de demande. Puisque nous considérons des données de différents pays, l'hypothèse du « toute chose égale par ailleurs », nécessaire à la construction d'une courbe de demande, ne tient pas.

Des différences de demande peuvent par exemple être en partie une fonction de différences en niveaux de revenu plutôt que de niveaux de prix. D'autres facteurs jouent un rôle : le fait par exemple que les américains conduisent plus que les européens parce que les distances (surtout dans l'Ouest des Etats-Unis) sont beaucoup plus grandes que dans beaucoup de pays européens. Mais il semble qu'il y ait une relation claire entre prix et consommation. Les données ici présentées montrent qu'il faudrait un saut significatif dans le prix — allant de 0,5 à 1 dollar par gallon ou plus — pour affecter de manière significative la consommation.

Figure 18. Prix de l'essence en fonction de sa consommation dans les pays industrialisés, 2012



Sources: U.S. Energy Information Administration database, *International Energy Statistics*; GIZ, *International Fuel Prices 2012/2013*; World Bank, *World Development Indicators* (Population).

Note: Les prix de l'essence sont en dollar par gallon, la consommation est en gallon par habitant et par an. Les données sont de 2012. L'ovale représente la combinaison prix/consommation par habitant des pays d'Europe occidentale.

Une telle taxe serait-elle possible politiquement ? Surtout aux Etats-Unis, des taxes élevées sur l'essence et sur les autres combustibles soulèveraient une opposition farouche, la liberté de conduire étant considérée comme fondamentale.

Comme le montre la Figure 18, les Etats-Unis ont de loin la consommation par habitant la plus élevée et les prix les plus bas à l'exception du Moyen Orient. Mais notons deux points importants dans la proposition pour une taxe carbone substantielle :

- Premièrement, la redistribution des revenus pourrait rediriger les revenus de la taxe carbone et d'autres taxes écologiques vers la réduction d'autres taxes. La majeure part de l'opposition politique envers des taxes élevées sur l'énergie provient de la perception qu'il s'agirait de taxes *supplémentaires* — venant s'ajouter aux impôts que les gens paient déjà sur le revenu, la propriété, la sécurité sociale, etc. Si une taxe carbone était par exemple couplée avec une baisse substantielle des impôts sur le revenu ou la sécurité sociale, elle pourrait devenir politiquement acceptable.
- L'idée d'accroître les taxes sur les "méfaits" économiques tels que la pollution, tout en réduisant les taxes sur ce que l'on veut encourager, tels que le travail et l'investissement capitaliste, ressort entièrement des principes de l'efficacité économique.⁶⁶ Plutôt que d'une augmentation nette de la taxe, cela reviendrait à un **transfert de taxe neutre pour le revenu** — la somme totale que les citoyens paient au gouvernement en impôts et taxes serait inchangée. Une portion des revenus de la taxe carbone pourrait être aussi utilisée pour fournir une aide aux populations de faibles revenus afin de compenser le fardeau des coûts élevés en énergie.
- Deuxièmement, si un tel transfert de taxe, neutre en revenu, a bien lieu, les individus ou les entreprises qui sont plus efficaces dans leur consommation énergétique, dépenseraient moins et feraient des économies. Les coûts plus élevés en énergie créeraient aussi une incitation puissante pour des innovations technologiques économisant l'énergie et stimulant de nouveaux marchés. L'adaptation économique serait plus facile si une augmentation graduelle des taxes carbone s'accompagnait d'une diminution graduelle des taxes sur le revenu et sur le capital au cours du temps.

Les systèmes de permis transférables et échangeables

Une mesure alternative à la taxe carbone est la mise en place **d'un système de plafonnement de permis à émettre transférables et échangeables sur le marché**.

Ce système peut être national ou international, comprenant plusieurs pays. Un système international marcherait de cette manière:

- On allouerait à chaque pays un certain niveau d'émissions de CO₂. Le nombre total de permis à émettre serait égal à l'objectif national désiré. Par exemple, si les émissions d'un pays sont actuellement de 40 millions de tonnes et que l'objectif politique est de réduire ces émissions de 10%, alors le pays disposerait de permis à émettre pour un total de 36 millions de tonnes. Au cours du temps, cet objectif pourrait être de plus en plus ambitieux, et le nombre de permis à émettre de moins en moins nombreux sur le marché.

⁶⁶ Afin d'encourager des investissements plus importants, les revenus de la taxe carbone pourraient être utilisés pour diminuer les taxes sur les gains en capital, ou taxes sur les corporations.

- Chaque source d'émissions à l'intérieur de chaque pays se verrait allouer des permis à émettre. Il ne serait pas faisable d'inclure tous les véhicules existants dans un système de permis. C'est la raison pour laquelle toutes les propositions retiennent l'allocation de permis aux plus gros émetteurs, tels que les centrales électriques et les usines, ou les principaux fournisseurs en énergie au travers desquels les combustibles entrent dans l'économie nationale – importateurs de pétrole, mines de charbon, etc....
- Ces permis pourraient à l'origine être alloués gratuitement sur la base des émissions passées ou pourraient être vendus aux enchères. Cependant, il existe une différence importante dans la distribution des coûts et de bénéfices : offrir des permis gratuitement revient à une subvention octroyée par le gouvernement aux industries polluantes alors qu'une mise aux enchères des permis impose des coûts réels sur ces entreprises et génère des revenus publics.
- Les entreprises sont ensuite libres d'échanger ces permis entre elles. Les entreprises dont les émissions excèdent le nombre de permis dont elles disposent doivent acheter des permis supplémentaires ou bien payer de lourdes pénalités. Inversement, les entreprises qui sont capables de réduire leurs émissions en dessous de leur allocation, chercheront à vendre leurs excès de permis en faisant un profit. Le prix des permis se fixera à travers les négociations du marché des permis. Il est également possible pour des groupes d'activistes écologistes ou d'autres organisations d'acheter des permis afin de les retirer du marché, réduisant ainsi le montant total des émissions permises.
- Dans un système international, des nations et les entreprises pourraient aussi recevoir des crédits pour avoir financé les efforts de réduction d'émissions dans d'autres pays. Par exemple, une entreprise allemande peut obtenir des crédits pour l'installation d'équipement électrique efficace en Chine, remplaçant des centrales électrique à charbon hautement polluantes.

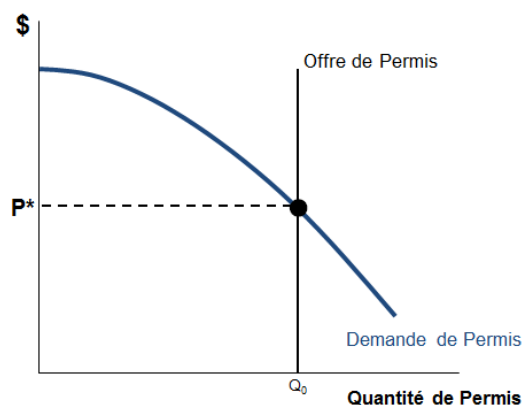
D'un point de vue économique, l'avantage d'un système d'échange de permis provient de ce qu'il encourage l'application des **options de réduction de carbone à moindre coût**. Les permis à polluer ont permis efficacement de réduire les émissions en sulfure et en oxyde d'azote au moindre coût. Selon la façon dont les permis sont alloués, ce système peut permettre à des pays en développement de transformer leurs permis en commodités à exporter, si ces pays font le choix d'énergies non basées sur le carbone pour leur développement. Ils seraient alors capables de se passer de leurs permis et de les vendre à des pays industrialisés qui ont des difficultés à respecter leurs engagements de réduire leurs émissions. Les agriculteurs ainsi que les forestiers pourraient également recevoir des crédits carbone s'ils utilisent des méthodes qui stockent le carbone dans les sols et préservent les forêts.

Alors que le gouvernement détermine le nombre de permis disponibles, le prix des permis résulte du marché pour les permis. Dans ce cas, la courbe de l'offre est fixe ou verticale, fixée au nombre de permis alloués, comme le montre la Figure 19. L'offre de permis est fixée à Q_0 . La courbe de la demande des entreprises en permis à polluer représente leur volonté de payer pour s'en procurer. Les entreprises sont prêtes à payer pour des permis jusqu'au point où elles peuvent encore faire des profits en émettant du carbone.

Supposons que les permis sont vendus aux enchères un par un en commençant par les entreprises qui renchérissent au plus haut pris. La Figure 19 montre que pour le premier permis à vendre le prix que les entreprises sont prêtes à payer est élevé car une entreprise particulière peut faire un grand profit en étant autorisée à polluer dans la mesure de ce premier permis. Pour le second permis, les entreprises qui n'ont pas obtenu leur permis renchériraient de la même manière qu'au premier coup. L'entreprise qui a remporté le premier permis pourrait renchérir pour le second mais on peut s'attendre à ce qu'elle propose un prix inférieur, si l'on suppose que ses profits marginaux déclinent (c'est-à-dire que sa courbe d'offre monte, ce qui est normal).

Que ce soit la même entreprise qu'au premier coup qui gagne le second permis ou bien une autre entreprise, le prix de vente de ce second permis sera plus bas. Ce processus continue, chacun des permis successifs étant vendu à un prix moindre que le permis précédent, jusqu'à ce que le dernier permis soit vendu aux enchères. Le prix de ce dernier permis, représenté par P^* dans la figure, est le prix d'équilibre du marché. On peut aussi interpréter P^* comme le bénéfice marginal, ou le profit, associé au droit d'émettre la Q_0 ème unité de charbon.

Figure 19. Détermination du prix des permis à émettre



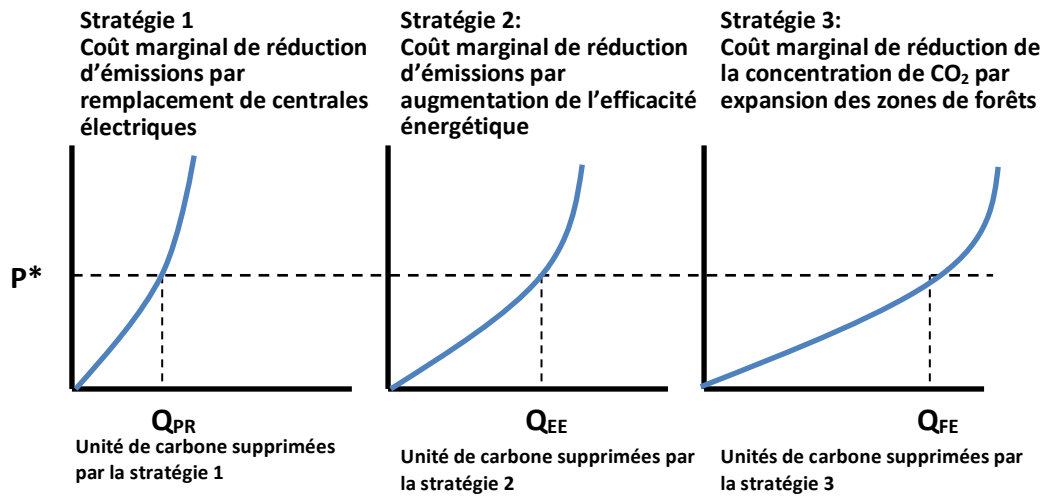
Note: La demande de Permis est la courbe qui représente ce que les demandeurs sont prêts à payer

Alors que tous les permis peuvent théoriquement être vendus à des prix différents, les marchés des permis à émettre sont généralement organisés avec pour prix le prix d'équilibre. C'est le cas pour le programme mis en place aux États-Unis en 1995 pour lutter contre les pluies acides, et largement considéré comme un succès. Dans ce programme, toutes les parties qui ont un intérêt à acheter des permis font leur offre, en indiquant combien de permis elles veulent acheter et à quel prix. L'entreprise qui propose le prix le plus élevé obtient tous les permis qu'elle demande. Ensuite les entreprises qui ont demandé des permis à des prix un peu plus bas obtiennent leurs permis, et ainsi de suite jusqu'à ce que tous les permis soient alloués. Le prix de vente pour tous les permis est l'offre faite au prix qui permet de se procurer le dernier permis disponible. Ce prix est P^* dans la Figure 19. Toutes les entreprises qui ont enchéri à des prix inférieurs ne reçoivent pas de permis.

Un autre point important est que chaque entreprise peut choisir de réduire ses émissions de carbone d'une manière qui soit efficace d'un point de vue du coût. Les entreprises ont plusieurs options pour réduire leurs émissions de carbone. La Figure 20 montre un exemple où une entreprise a trois stratégies pour réduire ses émissions de carbone : remplacer de vieilles usines par des nouvelles, investir dans des technologies énergétiques plus efficaces, et enfin financer l'expansion de forêts afin d'accroître la capacité à capter du carbone dans la biomasse. Dans chaque cas, la figure montre les **coûts marginaux de réduction des émissions** de carbone pour chaque stratégie. Ces coûts marginaux augmentent généralement au fur et à mesure que plus d'unité de carbone sont supprimées, mais ils peuvent être plus élevés et grimper plus rapidement pour certaines options que pour d'autres.

Dans cet exemple, il est possible de remplacer des vieilles usines en utilisant des technologies nouvelles à faible empreinte carbone, mais ceci tend à augmenter les coûts marginaux – comme le montre le premier graphe de la Figure 20. La réduction des émissions opérée par une plus grande efficacité énergétique montre des coûts marginaux plus faibles, comme le montre le graphe du milieu. Enfin, la captation du carbone au travers de l'expansion de zones forestières a les coûts marginaux les plus faibles. Le prix des permis P^* (tel que défini dans la Figure 19) déterminera les niveaux relatifs d'application de chacune de ces stratégies. Les entreprises trouveront profitable de réduire leurs émissions avec une option politique donnée aussi longtemps que le coût de cette option est moins élevé que l'achat d'un permis. Dans cet exemple, nous voyons que l'expansion de l'aire forestière constituerait la majeure part de la réduction de carbone; alors que le remplacement des usines ne serait utilisé que pour une moindre part.

Figure 20. Trois stratégies de réduction de carbone avec un système de permis



Note: Les coûts marginaux ici présentés sont hypothétiques.

L'analyse indique que l'expansion des zones forestières serait l'option utilisée pour atteindre la part la plus importante de la réduction (Q_{FE}), mais que le remplacement des usines et l'augmentation de l'efficacité énergétique contribueraient également (Q_{PR} et Q_{EE} respectivement) à l'équilibre de marché.

Les entreprises, et les nations si le programmes est international, qui participant à de tels systèmes d'échange de permis peuvent décider par eux-mêmes dans quelle proportion ils veulent appliquer chacune des stratégies, et auront tendance naturellement à favoriser les méthodes les moins coûteuses. Cela impliquera probablement une combinaison d'approches différentes. Supposons qu'un pays s'engage dans un programme de reforestation extensive. Il est alors probable qu'il dispose d'un excès de permis, qu'il peut alors vendre à un autre pays ne disposant que de peu d'options de réduction à bas coût. L'effet net sera l'application à l'échelle mondiale de techniques de réduction au moindre coût.

Ce système combine les avantages de l'efficacité économique avec un résultat garanti : la réduction des émissions au niveau Q^* . Le problème est bien sûr de parvenir à un accord sur l'allocation initiale des permis, et de décider si les permis seront alloués gratuitement ou bien par une vente aux enchères.

Il se peut qu'il y ait aussi des problèmes de mesure, et des questions portant sur ce que l'on doit compter, seulement les émissions de carbone provenant du secteur commercial ou également les émissions provenant des changement d'attribution des terres associés avec l'agriculture et la sylviculture.

Faire entrer l'agriculture et la sylviculture a des avantages car cela permet d'inclure un éventail plus large de stratégies de réduction, certaines étant à des coûts plus

réduits, mais cela pose aussi des problèmes de nature diverse, d'abord en ce qui concerne la mesure du carbone stocké par une utilisation différente des terres, mais surtout des questions éthiques, en particulier dans les pays en développement, si ces nouvelles politiques agricoles visant à stocker du carbone sont imposées par les gouvernements à travers la confiscation des terres des petits paysans ou des peuples autochtones, renforçant ainsi des pratiques de « land-grabbing » à l'avantage de grands groupes de l'agro-industrie, sensés mettre en œuvre ces mesures de stockage de carbone dans les sols et forêts⁶⁷.

Sous le programme des Nations Unies, REDD (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation), les grandes entreprises des pays industrialisés peuvent acheter des crédits à investir dans des programmes REDD dans les pays en développement. Ces crédits comptent dans la comptabilité carbone de ces grandes entreprises comme des réductions de carbone (alors que celles-ci peuvent continuer à polluer). Dans la pratique, elles acquièrent des terres et des forêts dans les pays pauvres à des prix bas pour elles mais très élevés pour les populations locales. La concentration de la propriété privée des terres agricoles et des forêts dans les mains de grands groupes industriels et financiers est en pleine accélération, au détriment des petits paysans en agriculture vivrière de subsistance. Ces pratiques peuvent également conduire à l'expulsion de leurs terres ancestrales de populations autochtones, comme au Kenya, où le gouvernement a expulsé plus de 15000 personnes du peuple Sengwer de leurs forêts, sous le prétexte de conservation de zones forestières, au travers d'un programme REDD sponsorisé par la Banque Mondiale.⁶⁸

Taxe carbone ou marché de permis à émettre ?

Le débat est très animé entre les tenants de la taxe carbone et ceux qui ne jurent que par les marchés de permis à émettre. Il existe des similarités entre les deux approches mais aussi d'importantes différences.

En théorie les deux instruments permettent d'aboutir à un niveau donné de réduction de pollution au moindre coût. Les deux approches résultent aussi dans la même augmentation de prix pour les consommateurs finaux. Toutes deux créent de

⁶⁷ Le "land-grabbing" est un phénomène très répandu dans les pays en développement où des gouvernements corrompus ou poussés par leur dette extérieure à accepter des compromissions, vendent des autorisations à des grandes multinationales d'exploiter des terres ou des zones forestières à des fins d'exploitation minières, de sylviculture, d'élevage ou d'agriculture de grande échelle. Les peuples premiers d'Amazonie, ainsi que de très nombreux peuples autochtones à travers le monde sont les victimes de telles pratiques. Nombreuses sont les voix de leurs représentants, ainsi que des ONGs défendant les droits des petits paysans les plus pauvres, tirant la sonnette d'alarme afin que la question du stockage du carbone dans les forêts et les sols ne soient pas "récupérée" par les grandes multinationales des pays du Nord, de la Chine, ou d'autres pays émergents, cherchant à contrôler encore davantage de terres au détriment des plus pauvres et des plus vulnérables, dont la subsistance dépend de ces terres et de ces forêts.

⁶⁸ N. Ahmed, "World Bank and UN Carbon offset scheme "complicit" in genocidal land grabs", *The Guardian*, 3 July 2014

fortes incitations pour l'innovation technique. Elles peuvent également toutes les deux augmenter les revenus de l'Etat dans la même mesure si tous les permis sont vendus. Enfin les deux approches peuvent être mises en application en amont de la production afin de réaliser la même réduction en proportion des émissions totales.

Cependant il existe plusieurs différences entre les deux. Les avantages de la taxe carbone comprennent:

- En général, une taxe carbone est plus simple à comprendre et plus transparente à expliquer qu'une approche par le marché des permis à émettre
- Si un changement technique est opéré, une taxe carbone réduira les émissions de carbone encore plus que prévu, tandis qu'avec le marché à émettre, le changement technique permettra de réduire le prix des permis.
- Une taxe carbone peut en général être mise en pratique plus tôt. Etant donné les besoins immédiats d'agir, il est conseillable de ne pas passer plusieurs années à organiser les détails d'un marché de permis à émettre.
- Peut-être l'avantage le plus important de la taxe carbone est le fait qu'elle procure une plus grande prédictibilité des prix. Si les entreprises et les ménages connaissent à l'avance quelles taxes futures seront appliquées sur les combustibles fossiles et autres produits émettant des gaz à effet de serre, ils investiront en en tenant compte. Par exemple, le choix d'un système de chauffage ou de climatisation peut dépendre de l'anticipation des prix futurs du fuel. Avec un système de marché de permis à émettre, les prix des permis peuvent varier considérablement, conduisant à une **volatilité des prix** qui rend toute planification difficile. Une taxe carbone en revanche, assure une stabilité des prix, surtout si les niveaux de la taxe carbone sont publiés très à l'avance.

Les avantages des marchés de permis à émettre comprennent:

- Bien que les marchés de permis à émettre résultent finalement aux mêmes niveaux d'augmentation de prix pour les consommateurs et les entreprises, ils permettent d'éviter la connotation négative du terme « taxe ». Ainsi les marchés de permis à émettre sont généralement plus faciles à mettre en œuvre politiquement qu'une taxe carbone.
- Certaines entreprises préfèrent les marchés de permis à émettre parce qu'elles croient pouvoir exercer un pouvoir de lobby auprès des gouvernements pour obtenir des permis gratuitement. Les gouvernements distribuent souvent des permis gratuits dans la première phase d'un programme de marché de permis à émettre pour le rendre plus acceptable politiquement par les entreprises.
- Le plus grand avantage de l'approche par les marchés de permis à émettre est que le niveau final d'émissions est connu avec certitude parce que le

gouvernement détermine le nombre de permis qui seront échangés sur le marché. Etant donné que le but ultime est la réduction des émissions de carbone, l'approche par le marché des permis à émettre y aboutit directement alors que l'approche par la taxe carbone y aboutit indirectement au travers de l'augmentation des prix. Avec un marché des permis à émettre, on peut aboutir à une trajectoire de réduction des émissions précises au travers de la programmation du nombre de permis disponibles au cours du temps. Avec une taxe carbone, afin d'atteindre cet objectif quantitatif précis sur la quantité de réduction d'émissions, il est possible que l'on doive faire plusieurs ajustements des taux de la taxe, ce qui peut être politiquement difficile à faire passer.

Le choix de l'instrument – taxe carbone ou marché des permis à émettre – dépend surtout des décideurs politiques et de leurs priorités selon qu'ils se préoccupent surtout de l'incertitude sur les prix ou de l'incertitude sur le niveau d'émissions. Si l'on choisit l'approche de la certitude sur les prix car elle permet une planification de long terme, alors une taxe carbone serait préférable. Si l'on croit que le but politique pertinent est de réduire les émissions de carbone avec une quantité précise connue avec certitude, alors l'approche par les marchés de permis à émettre est préférable, bien qu'elle puisse conduire à une volatilité des prix.

Une autre différence provient du fait que les revenus des taxes carbone sont plus souvent reversés aux contribuables ou utilisés par le gouvernement pour des dépenses publiques, alors que les revenus des ventes aux enchères des permis à émettre sont plus souvent utilisés en investissements « verts » en particulier les énergies renouvelables, les mesures d'efficacité énergétique et la conservation des forêts.⁶⁹

Enfin, comme nous l'avons évoqué plus haut, les marchés de permis à émettre peuvent avoir des effets pervers dans les pays en développement quand des permis carbonés reviennent à l'achat de terres agricoles et de forêts, aux mains de grandes et puissantes entreprises des pays du Nord, conduisant à l'éviction de petits paysans pauvres ou de peuples autochtones des pays du Sud. On peut donc argumenter en faveur des taxes carbonés qui elles, offrent véritablement une incitation directe à tous les acteurs économiques des pays industrialisés de réduire leurs émissions, tandis que les marchés de permis à émettre, s'ils sont internationaux et incluent les pays en développement, peuvent conduire à toutes sortes de corruption et d'effets pervers, en ce que les grandes entreprises des pays du Nord peuvent rejeter la responsabilité de la réduction des émissions sur les pays du Sud, au travers de programmes REDD, dont la mise en pratique peut conduire à de graves abus des droits humains.

⁶⁹ Carl and Fedor, 2016.

Autres outils politiques: Subventions, Standards, R&D, et Transferts de Technologie

Les problèmes politiques peuvent empêcher l'adoption de taxes carbone ainsi que de systèmes de permis transférables. Heureusement, il existe d'autres mesures politiques qui ont le potentiel de diminuer les émissions de carbone. Même si l'on parvient à mettre en œuvre de manière généralisée une taxe carbone ou un système de marché de permis, il est nécessaire d'introduire des mesures politiques supplémentaires afin de réduire le niveau d'émissions de manière suffisante afin de maintenir le réchauffement climatique dans des limites acceptables. Ces politiques supplémentaires ne sont en général pas considérées comme suffisantes à elles seules mais elles forment une composante importante dans une approche exhaustive de la question. Elles sont pour la plupart déjà mises en œuvre dans un grand nombre de pays. Elles comprennent:

- Le transfert des subventions des combustibles fossiles vers d'autres sources d'énergies à empreinte carbone nulle. Plusieurs pays subventionnent de façon directe ou indirecte les combustibles fossiles. L'élimination de ces subventions changerait la nature de la concurrence en faveur des sources d'énergie alternatives. Si l'argent de ces subventions était redirigé vers les énergies renouvelables, surtout sous la forme d'abattement fiscal pour l'investissement, cela pourrait promouvoir l'essor de l'investissement dans les énergies renouvelables.
- L'utilisation de standards d'efficacité pour les équipements, machines, matériels électriques, et de standards exigeant de faibles consommations de carbone dans les véhicules. A travers l'imposition de ces standards, les technologies et les pratiques se transforment en faveur d'une trajectoire à faible empreinte carbone.
- Les dépenses en Recherche et Développement (R&D) afin de promouvoir la commercialisation de technologies alternatives. Cette commercialisation peut être accélérée à la fois par des programmes gouvernementaux de R&D et par un traitement fiscal approprié des programmes de R&D de l'industrie privée favorisant l'adoption d'énergies alternatives. L'existence d'une technologie de substitution d'énergie non basée sur le carbone réduit le coût économique de mesures telles que la taxe carbone et si l'alternative devient pleinement compétitive avec les combustibles fossiles, la taxe carbone ne serait plus nécessaire.
- Les transferts de technologie vers les nations en développement. Le gros de la croissance projetée des émissions de CO₂ proviendra du monde en développement. Plusieurs des projets énergétiques sont maintenant financés par des agences telles que la Banque Mondiale et les banques régionales de développement. Dans la mesure où ces fonds peuvent être dirigés vers des systèmes énergétiques ne reposant pas sur le carbone, et suppléés par d'autres fonds intégralement dédiés au développement

d'alternatives énergétiques, alors il devient économiquement faisable pour les nations en développement de se détourner de trajectoires de croissance reposant sur la forte consommation de combustibles fossiles, et d'atteindre en même temps des bénéfices écologiques significatifs.

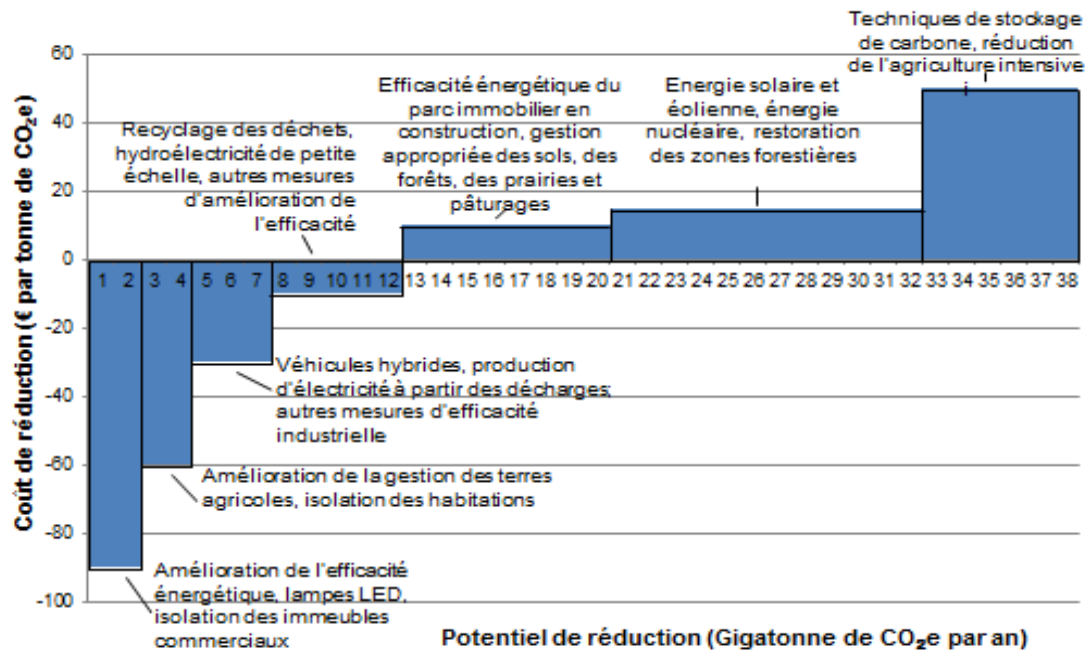
Les défis techniques du changement climatique

Le défi du changement climatique n'exige pas uniquement des instruments de politique économique mais aussi des innovations techniques. Les instruments des politiques économiques tels que les taxes carbone, les permis à émettre, et les subventions, utilisent des incitations permettant de motiver des changements de comportements. Par exemple, une taxe carbone qui fait monter le prix de l'essence créera des incitations à conduire moins ou à acheter un véhicule moins consommateur d'essence. Mais on peut également considérer le changement climatique d'un point de vue technologique. Les politiques économiques peuvent créer des incitations puissantes facilitant les changements techniques. En raison des prix de l'essence plus élevés, résultant d'une taxe carbone, la demande s'accroît pour les véhicules plus efficaces, ce qui motive les entreprises automobiles à diriger plus d'investissement vers les hybrides et les véhicules électriques.

Une analyse célèbre et souvent citée, réalisée par McKinsey & Company, a examiné des options techniques diverses en calculant l'impact qu'elles auraient en terme de mitigation ou de réduction de gaz à effet de serre, à l'échelle mondiale. Les résultats de l'analyse McKinsey sont présentés dans la Figure 21. Les diverses options sont classées par ordre de coût de la moins coûteuse à la plus onéreuse. La logique économique est qu'il va de soi que l'on doit commencer à appliquer les actions qui réduisent les émissions de carbone à un moindre coût et ensuite continuer avec les actions plus coûteuses.⁷⁰

⁷⁰ McKinsey & Company, 2007 and 2009.

Figure 21- Courbe des coûts de diverses mesures de réduction des gaz à effet de serre, à l'horizon 2030



Source: Adapté de McKinsey & Company, 2009, et 2013 .

Note: Les coûts sont estimés en Euros, mais l'analyse couvre des possibilités de réductions dans le monde entier.

L'axe des Y indique le coût de chaque option de réduction, mesuré en Euros par tonne de dioxyde de carbone supprimée par an (ou, pour des gaz à effet de serre différents tels que le méthane, un niveau équivalent à une tonne de CO₂).

L'épaisseur de la barre représente les niveaux d'émissions de CO₂ qui peuvent être évités par chaque action. Le coût des mesures telles que l'isolation des immeubles, l'augmentation de l'efficacité énergétique, et le recyclage des déchets, est dans le *négatif*. Cela veut dire que ces mesures permettraient en fait de faire des économies, indépendamment du fait qu'elles permettent de réduire les émissions de CO₂. Donc, même si on ne se préoccupait pas de changement climatique et d'environnement, il serait logique de faire isoler les immeubles, de changer son équipement électrique, de recycler ses déchets, ne serait-ce que pour des raisons financières.

L'axe des X donne la quantité cumulée d'émissions de CO₂ supprimées par rapport au scénario « business-as-usual » si l'on met en œuvre toutes les actions à partir de la gauche. Donc, si l'on mettait en œuvre toutes les options à coûts négatifs, y compris l'amélioration de l'efficacité des appareils de climatisation, des systèmes d'éclairage, des chauffe-eau, etc..., le total de la réduction en équivalent CO₂ serait d'environ 12 milliards de tonnes de CO₂ par an, tout en économisant de l'argent !

Si l'on se déplace vers la droite de la figure 21, les actions identifiées sont à coût positif. Autrement dit, réduire les émissions de CO₂ grâce à ces mesures coûte de l'argent. Celles qui coûtent moins de 60 Euros par tonne de CO₂ incluent l'expansion de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne, l'expansion de l'énergie nucléaire, l'amélioration de la gestion des forêts, et la reforestation, et la mise en œuvre de méthodes de capture et de stockage du carbone.

Si toutes ces mesures étaient appliquées, le total des émissions évitées, serait de 38 milliards de tonnes en équivalent CO₂ par an. Si l'on inclut tous les gaz à effet de serre, le total de leurs émissions en CO₂ équivalent est à l'heure actuelle de 50 milliards de tonnes (Gigatonnes – Gt) par an, et l'on projette qu'elles seront de 70 Gt par an en 2030. Ainsi, si toutes ces mesures étaient prises à l'horizon 2030, au lieu de 70 Gt, ce serait $70 - 38 = 32$ Gt qui seraient émises par an, c'est-à-dire 18 Gt de moins qu'aujourd'hui. Des réductions supplémentaires pourraient être atteintes à un coût légèrement supérieur, en particulier par une expansion encore plus ambitieuse des énergies éolienne et solaire. L'analyse de McKinsey ne prend pas en compte le fait que les coûts des énergies renouvelables seront probablement de moins en moins élevés à l'avenir.

Le coût total de la mise en œuvre de toutes les options présentées dans la figure 21, en considérant que certaines options permettent en fait de faire des économies, est estimé à moins de 1% du PIB mondial de 2030. Le rapport insiste sur le fait que prendre un retard de 10 ans sur la mise en œuvre de ces mesures rendra le cap des 2°C extrêmement difficile à maintenir.

Les recommandations nécessaires à cette mise en œuvre comprennent:

- Etablir des standards techniques très stricts pour l'efficacité énergétique des immeubles et des véhicules.
- Etablir des incitations stables dans le long-terme pour les entreprises industrielles et productrices d'électricité afin qu'elles puissent investir dans des technologies énergétiques efficaces.
- Fournir aux nouvelles technologies liées aux énergies renouvelables des soutiens et subventions du gouvernement, au travers d'incitations économiques et d'autres mesures.
- Assurer une gestion efficace des forêts et de l'agriculture, en particulier dans les pays en développement.⁷¹

⁷¹ Ibid.

4. LES POLITIQUES CLIMATIQUES DANS LA PRATIQUE

Le Changement du Climat Mondial est une question écologique internationale. En termes de théorie économique, le changement climatique est une question de bien public, qui demande une collaboration mondiale afin de parvenir à des résultats efficaces. Depuis 1992, date à laquelle la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques a été établie, des négociations incessantes ont eu lieu, au cours des “Conférences des parties” ou COPs, ayant lieu annuellement, et dont l’objectif a été d’aboutir à un accord global sur la réduction des émissions (voir tableau 5).

Chaque nation a peu d’incitation à réduire ses émissions si les autres nations n’acceptent pas des réductions similaires car la réduction unilatérale des émissions imposerait des coûts significatifs au pays qui prendrait cette décision seul, tout en ayant un effet négligeable sur le climat mondial. Ainsi, un accord international contraignant et à caractère obligatoire est nécessaire, surtout si l’objectif politique est de réduire les émissions de 50 à 80%.

Tableau 5: Historique des négociations sur le climat

Année, lieu	Evènement
1992, Rio de Janeiro	Les négociations commencent avec la finalisation de la convention-cadre des Nations-Unies sur le changement climatique. Les pays acceptent de réduire volontairement leurs émissions avec un sens de “responsabilité partagée mais différenciée”.
1995, Berlin	La première Conférence annuelle des parties prenantes de la Convention-cadre – « Conference of the Parties » ou COP. Il en résulte un calendrier sur les négociations pour les deux années suivantes. Les Etats-Unis acceptent que les pays en développement soient exemptés d’obligations à réduire leurs émissions.
1997, Kyoto	COP 3 débouche sur le Protocole de Kyoto. Les pays développés s’engagent à réduire les émissions de gaz à effet de serre à l’horizon 2008-2012. Il est prévu que les Etats-Unis devront les réduire de 7% au-dessous des niveaux de 1990.
1998, Buenos Aires	Prévoit un plan d’application de Kyoto durant les deux années suivantes jusqu’en 2000.
2000, The Hague	COP 6 : L’administration sortante de Clinton et les pays européens ne s’entendent pas sur les termes de l’accord. Les négociations échouent.
2001, Bonn	Les négociations reprennent sur les termes imposant l’accord sur les signataires et sur l’adaptation du texte, mais l’administration Bush rejette le traité, le qualifiant de « défectueux ».
2004, Buenos Aires	COP 10 : Les Etats-Unis bloquent les négociations formelles sur le traité Post-Kyoto. Les diplomates essaient d’engager des discussions informelles.

2009, Copenhague	COP 15 est un échec retentissant, puisqu'il ne débouche sur aucun accord ayant force d'obligation pour les pays. Il y est rappelé l'importance de limiter le réchauffement climatique au-dessous de 2°C mais sans fixer concrètement d'objectifs d'émissions à ne pas dépasser. Les pays développés promettent d'aider les pays en développement à atteindre leurs objectifs en matière d'émissions, à hauteur de 30 milliards de dollars par an, cette somme s'élevant à 100 milliards en 2020.
2011, Durban	COP 17 : Les pays participants s'engagent à adopter un traité universel ayant force de loi dès que possible, avant la date butoir de 2015, et devant prendre effet en 2020.
2015, Paris	COP-21 : 195 Nations signent l'Accord de Paris, le premier accord ayant une portée universelle, où tous les pays impliqués se sont engagés de manière volontaire à contribuer à des actions de réduction de leurs émissions (Contributions déterminées au niveau national – Nationally determined contributions – NDCs).

Source: d'après ClimateWire, Environment & Energy Publishing (E&E).

Le premier accord international sur le changement climatique fut le Protocole de Kyoto, adopté durant la troisième COP, en 1997. Les pays industrialisés se sont engagés dans ce traité à réduire leurs émissions à l'échéance 2008-2012 par rapport à leurs émissions de 1990. Par exemple, les Etats-Unis ont accepté une réduction de 7%, la France de 8% et le Japon de 6%. Les objectifs étaient d'environ 5% de réduction en moyenne par rapport à 1990. Les pays émergents comme la Chine et l'Inde n'étaient pas soumis aux mêmes contraintes selon le traité, et cette chose a été vivement critiquée par les Etats-Unis et d'autres pays. En Octobre 2007, 176 nations avaient déjà ratifié le Protocole de Kyoto.

Les résultats du Protocole de Kyoto furent mitigés. Certaines nations telles que le Canada et les Etats-Unis ont vu leurs émissions augmenter durant la période de validité du protocole. Le Canada s'est retiré du Protocole, et les Etats-Unis n'y sont jamais entrés, puisque, bien que l'Administration Clinton ait signé le protocole en 1998, le Congrès ne l'a jamais ratifié. En 2001, l'Administration Bush rejeta le Protocole de Kyoto déclarant que les négociations avaient échoué et qu'une nouvelle approche était nécessaire. Bien que ceci ait sérieusement freiné les efforts de contrôle des émissions de gaz à effet de serre, le Protocole de Kyoto est néanmoins entré en vigueur à partir du début 2005 quand la Russie a ratifié le traité en Novembre 2004. En 2012, le nombre de nations ayant signé le Protocole de Kyoto s'élevait à 191. Certains pays européens ont dépassé les objectifs qu'ils s'étaient fixés mais d'autres ne les ont pas atteints. La Russie et la plupart des pays d'Europe de l'Est ont dépassé de beaucoup leurs objectifs, non pas grâce à des politiques délibérées mais en raison de leur déclin industriel brutal au début des années 1990, provoqué par la chute du régime soviétique et de tous les régimes communistes de l'Est, et le passage à une économie de marché. Sans cette chute

vertigineuse, l'objectif de Kyoto n'aurait pas été atteint au niveau mondial. La Russie a gagné des revenus en échangeant ses réductions d'émissions avec d'autres pays, comme le permettait le mécanisme de flexibilité, mais les réductions des émissions russes se seraient produites de toute manière.

Cependant, lorsque l'on analyse les accords climatiques, il est important de prendre en considération la question du commerce international. En effet, dans le cadre du protocole de Kyoto, les émissions calculées au niveau national prenaient en compte la production à l'origine de ces émissions et non pas la consommation. Par exemple, une large partie des émissions de la Chine sont dues à des productions destinées à l'exportation, pour des produits qui seront ensuite consommés dans le reste du monde. Cette question de la délocalisation des émissions dans les pays émergents et en développement mais pour le bénéfice des nations importatrices, n'était pas prise en compte dans la comptabilité officielle de Kyoto. Si l'on tenait compte de l'ensemble de l'empreinte carbone des pays signataires de Kyoto, alors la mesure des progrès accomplis est bien moindre. Pour l'ensemble de l'Union Européenne, au lieu d'une réduction de 5% entre 1990 et 2008, la réduction "réelle", comprenant les émissions relatives aux biens importés par l'UE, n'est que de 1% en dessous des niveaux d'émissions de 1990. Pour l'ensemble des pays développés, si l'on inclut les émissions liées au commerce international, l'augmentation des émissions de 1990 à 2008 a été de 7%, et de 25% pour les Etats-Unis. En outre, puisqu'il n'y avait aucune restriction sur les émissions des pays en développement, ceux-ci ont continué à émettre des quantités croissantes de gaz à effet de serre pendant cette période, et au niveau mondial, les émissions n'ont pas cessé d'augmenter pendant toute la période de validité du protocole de Kyoto⁷².

Malgré le fait que le protocole de Kyoto ait été un échec dans son incapacité à ralentir les émissions globale, il a toutefois constitué une étape majeure dans la construction de l'édifice de la diplomatie climatique multilatérale mondiale. A partir des échecs de Kyoto, l'ensemble de la communauté internationale a progressivement tiré les leçons de ses erreurs et ce processus s'est avéré utile dans les étapes ultérieures de la négociation.

L'Accord de Paris de décembre 2015

Le Protocole de Kyoto prévoyait d'être remplacé par un accord universel sur les réductions des gaz à effet de serre, et la quinzième COP, réunie à Copenhague en 2009 était censée apporter les bases de ce nouvel accord international. Cependant l'échec retentissant de Copenhague a fait prendre conscience aux négociateurs de tous les pays du monde que l'approche adoptée jusque-là devait être changée. Le seul résultat positif de Copenhague fut de se mettre d'accord que l'objectif des

⁷² Clark, 2012.

négociations futures devrait être d'assurer une augmentation des températures inférieure à 2°C au-dessus des niveaux préindustriels.

Les points de désaccord les plus épineux tournaient autour de la question de la réduction des émissions par les pays en développement, à savoir s'il fallait leur imposer ou non des niveaux de réduction. Alors que certains pays, en particulier les Etats-Unis, soutenaient que l'ensemble des participants devaient accepter des réductions obligatoires, les pays en développement faisaient valoir le fait que de telles réductions limiteraient leur capacité à se développer économiquement et creuseraient davantage le fossé des inégalités entre pays riches et pays pauvres.

Après l'échec de Copenhague, l'idée d'un accord contraignant et avec des objectifs uniques, s'imposant à tous les pays du monde, fut rejeté comme étant inapplicable. A la place, les négociateurs proposèrent l'idée suivante: chaque pays proposerait volontairement ses propres objectifs et serait le seul en mesure de décider du niveau de réduction qu'il pourrait ou voudrait réaliser, à l'horizon temporel qui lui conviendrait. L'espoir qu'entretenaient les négociateurs était que chaque pays se sentirait en quelque sorte sous la pression de ses pairs et de la communauté internationale pour présenter l'objectif le plus ambitieux possible qui soit à sa portée. Cette nouvelle stratégie s'avéra gagnante, et permit aux négociateurs de jeter les bases du premier accord global, qui fut atteint en décembre 2015 à la vingt-et-unième Conférence des Parties (COP-21), à Paris.

Dans les mois qui précédèrent la COP-21, un intense ballet diplomatique eut lieu entre la délégation française, responsable de la présidence de la COP, et toutes les délégations du monde entier, afin de s'assurer du bon déroulement des étapes conduisant chaque pays à soumettre sa Contribution Déterminée au niveau National (CDN, ou en anglais, NDC – Nationally determined contribution). Au cours de l'année 2015, 186 nations se soumirent à cet exercice, indiquant leur volonté de contribuer à la réduction des émissions globales de CO₂. A Paris, 195 délégations nationales négocièrent pendant deux semaines, aboutissant à leur signature de l'Accord de Paris, qui exprime formellement l'objectif de la communauté internationale dans son unanimité de maintenir l'élévation des températures globales à moins de 2°C à l'horizon 2100, et de s'efforcer dans la mesure du possible de maintenir le réchauffement à moins de 1,5°C. Cet accord prévoit un cycle de 5 ans pendant lequel chaque pays doit revoir ses objectifs propres, afin de présenter des objectifs plus ambitieux. Le processus de négociation a été conçu pour accroître la pression sur chacune des nations afin qu'elles appliquent les objectifs qu'elles se sont fixés et qu'elles les revoient à la hausse tous les cinq ans.

L'accord repose sur un processus de comptabilité des réductions, exercé dans la plus grande transparence, reposant sur des inventaires réguliers, et sur des rapports fournis fréquemment par chaque pays sur les progrès accomplis dans la

réalisation de ses objectifs, l'évaluation de ces progrès étant réalisée par des équipes d'experts indépendants.

L'Accord de Paris a pris force de loi internationale en étant ratifié par plus de 80 pays représentant plus de 60% des émissions mondiales, en novembre 2016, moins d'un an après avoir été négocié, ce qui constitue un tour de force de rapidité pour un accord international. Malgré le fait que l'Administration Trump ait déclaré en Juin 2017 vouloir sortir de l'Accord de Paris, celui-ci reste en application, et les COP-22 à Marrakech (Novembre 2016) et COP-23 à Bonn (Novembre 2017) continuent de rythmer le calendrier de l'application de l'Accord, suivant les progrès accomplis par tous les pays du monde.

En marge de l'Accord de Paris, un autre accord signé en Octobre 2015 a également établi un calendrier pour l'élimination de la production des hydrofluorocarbones (HFCs) qui sont des gaz à effet de serre utilisés dans les climatiseurs et les réfrigérateurs, ayant un impact beaucoup plus élevé que le CO₂ sur le réchauffement climatique, et étant également responsables de la raréfaction de la couche d'Ozone dans la stratosphère.⁷³

L'Accord de Paris fournit également un cadre pour le soutien technique et financier aux pays en développement afin de les aider à s'adapter aux conséquences les plus déstabilisatrices du changement climatique, ainsi qu'à aider leur transition vers des sources d'énergies renouvelables propres. L'accord comprend une clause de pertes-et-dommages qui reconnaît l'importance des impacts négatifs et destructeurs du changement climatique que les pays en développement. Alors que l'Accord lui-même n'inclut pas de clause de responsabilité ni ne prévoit de compensation en cas de catastrophe climatique, il indique les conditions selon lesquelles une aide pourrait être octroyée. A partir de 2020, les nations industrialisées ont promis une enveloppe de 100 milliards de dollars par an en aide financière et technique, pour les pays en développement dans leur combat contre le changement climatique.⁷⁴

Plusieurs voix dans le monde en développement se sont élevées pour dénoncer le fait que cette somme de 100 milliards de dollars est bien trop faible par rapport à l'ampleur des besoins, et qu'une estimation beaucoup plus réaliste serait d'environ 600 milliards de dollars, soit 1,5% du PIB des nations industrialisées. Certaines des estimations par la Banque Mondiale ou par l'International Institute for Applied Systems Analysis, à Vienne, font état d'un besoin financier encore plus important, de l'ordre de 1,7 à 2,2 trillions de dollars par an.⁷⁵

⁷³ Coral Davenport, "Paris Climate Deal Reaches Milestone as 20 More Nations Sign On," *New York Times*, September 21, 2016; Coral Davenport, "Nations, Fighting Powerful Refrigerant that Warms Planet, Reach Landmark Deal," *New York Times*, October 15, 2016.

⁷⁴ "Adoption of the Paris Agreement" <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>

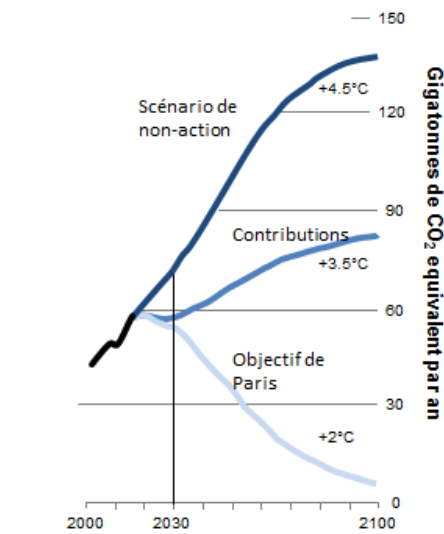
⁷⁵ www.scientificamerican.com/article/poorer-nations-demand-more-aid-to-deal-with-climate-change/; <http://roadtoparis.info/2014/11/06/climate-finance-too-little-too-late/>

Les contributions promises par les pays sont-elles ou non adéquates ?

Une organisation indépendante, “Climate Action Tracker” a fait le bilan carbone de toutes les CDNs, ou contributions déterminées au niveau national, afin de les comparer les unes aux autres et de les classer.⁷⁶ Selon son système de classement en trois notes, “adéquat”, “passable”, “inadéquat”, la contribution proposée par les Etats-Unis est qualifiée de “passable”, celle de la Chine, “passable mais avec un objectif inadéquat en ce qui concerne l’intensité en carbone”, et celle de l’Union Européenne est aussi qualifiée de “passable.” Cette note passable attribuée aux USA s’applique à la proposition de l’Administration Obama de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 26 à 28% par rapport à 2005, à l’horizon 2025. Il va de soi que cette note ne s’applique plus, à l’heure où l’Administration Trump a décidé de se retirer de l’Accord de Paris. Dans ce nouveau contexte, dans le classement du Climate Action Tracker, les Etats-Unis seront certainement les derniers de la classe !

Le Climate Action Tracker classe aussi parmi les mauvais élèves, ayant toutes des promesses “inadéquates” une longue liste de pays, comprenant la Russie, le Japon, l’Australie, la Nouvelle Zélande, le Canada, l’Argentine, l’Afrique du Sud, le Chili, et la Turquie.⁷⁷ La Figure 22 montre les différences entre les émissions de : 1) la trajectoire “business-as-usual”; 2) la trajectoire qui résulterait d’un agrégat de toutes les contributions faites dans l’Accord de Paris; et 3) la trajectoire qui serait nécessaire pour ne pas dépasser 2°C.

Figure 22. Trois trajectoires : Business as Usual, Contributions faites dans l’Accord de Paris, Chemin vers 2°C



Source: <https://nyti.ms/2pdbZhxx>

⁷⁶ Pour une analyse plus détaillée, voir le Climate Policy brief #2, du GDAE, After Paris: the new landscape for Climate Policy. <http://www.ase.tufts.edu/gdae/Pubs/climate/ClimatePolicyBrief2.pdf>

⁷⁷ <http://climateactiontracker.org/methodology/85/Comparability-of-effort.html>;
<http://www.wri.org/blog/2015/07/japan-releases-underwhelming-climate-action-commitment>

La plupart des promesses de contributions ne vont pas au-delà de 2030, d'où la raison pour laquelle les émissions recommencent à augmenter après 2030 dans la figure 22. Un renforcement considérable des promesses et des contributions de plus en plus ambitieuses seront nécessaires afin de garder le cap des 2°C et il va sans dire que l'objectif de ne pas dépasser 1,5°C, que l'on s'efforcera d'atteindre comme il est mentionné dans l'Accord de Paris, demanderait des efforts encore plus considérables.⁷⁸

Selon l'analyse du Climate Action Tracker, si les mesures proposées par les nations dans leurs promesses de contribution à la réduction des émissions devaient se continuer avec la même intensité au-delà de 2030, elles mèneraient globalement à un réchauffement médian d'environ 2,7°C à l'horizon 2100 – légèrement mieux que le 3,5°C atteint par la trajectoire des contributions de Paris si elle était discontinuée après 2030, mais encore bien trop élevé par rapport aux objectifs de l'Accord de Paris.⁷⁹ L'encadré 6 offre une perspective scientifique justifiant les objectifs de Paris, d'un réchauffement de 1,5°C au mieux et au plus, de 2°C.

Afin de mieux se rendre compte de ce que les objectifs de 2°C et de 1,5°C représentent, il est utile d'avoir recours au concept de **budget carbone global**. Un budget carbone global calcule les émissions cumulées de carbone qui peuvent être rajoutées à l'atmosphère sans excéder une augmentation de température spécifique. Afin d'atteindre un objectif de 2°C, il est nécessaire de rester en-deçà d'une accumulation supplémentaire de 270 gigatonnes (milliards de tonnes) de Carbone dans l'atmosphère – ce qui revient à 30 ans d'émissions aux niveaux actuels. Afin de rester en deçà de 1,5°C, le budget est à peine de 110 gigatonnes supplémentaires – ce qui représente 12 ans d'émissions aux taux actuels.⁸⁰ Les promesses faites par l'ensemble des nations à Paris sont beaucoup trop faibles pour atteindre ces objectifs, sans qu'elles prennent des mesures beaucoup plus ambitieuses de réduction de leurs émissions au cours des cycles de négociations prochains.

⁷⁸ Millar et al., 2016.

⁷⁹ http://climateactiontracker.org/assets/publications/briefing_papers/CAT_Temp_Update_COP21.pdf

⁸⁰ The Global Carbon Project, "Global Carbon Budget," <http://www.globalcarbonproject.org/>; Schellnhuber et al, 2016.

ENCADRÉ 6: LA BASE SCIENTIFIQUE DES OBJECTIFS CLIMATIQUES DE L'ACCORD DE PARIS

Quelles sont les raisons pour lesquelles l'Accord de Paris a fixé ses objectifs climatiques autour de la température plafond de 2°C, avec comme objectif plus ambitieux de ne pas dépasser 1,5°C ?

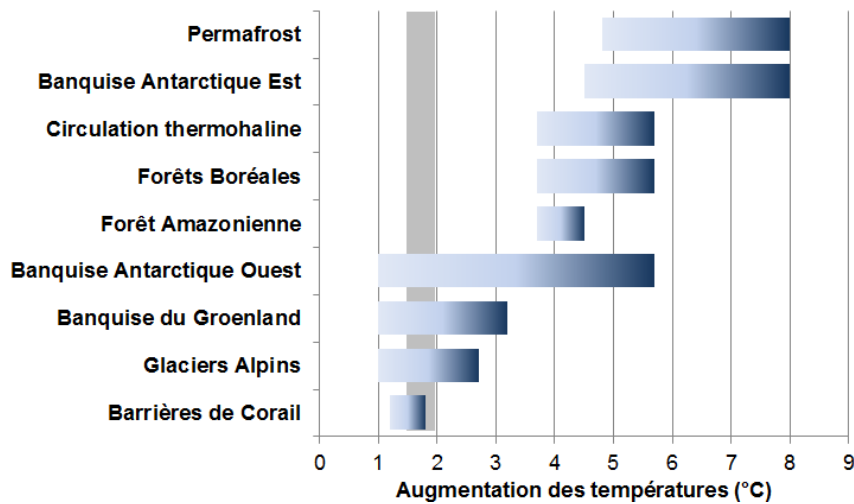
Une étude de 2016 passe en revue les probabilités que toutes sortes d'événements catastrophiques surviennent et que des pertes irréversibles se produisent, telles que celles des glaciers alpins, ou de la forêt amazonienne. Les auteurs de cette étude ont recensé toutes les recherches existantes pour déterminer l'intervalle d'augmentation de températures correspondant à des fortes probabilités pour que ces événements aient lieu. La figure 23 résume cette étude. La barre pour chaque impact reflète l'incertitude scientifique autour de la question de l'inévitabilité de tels événements se produisant à partir de quelle augmentation de température. Plus la couleur est foncée plus la probabilité est grande que ces impacts aient lieu. Par exemple, si la température globale augmente de 1°C seulement, la probabilité de la perte des glaciers alpins est très petite. Mais si les températures augmentent de plus de 2,5°C, il est presque certain, en l'état des recherches conduites, que les glaciers alpins disparaîtront.

La barre verticale de couleur grise représente l'intervalle des températures de 1,5°C à 2,0°C, correspondant aux objectifs de l'Accord de Paris. Si l'on compare ces objectifs avec les différents impacts, on s'aperçoit que l'objectif de 1,5°C offre une chance aux grandes barrières de corail de survivre. Mais à 2°C, il est presque certain que les coraux auront disparus. A 2°C, on a encore une chance de sauver les glaciers alpins, la couverture de glace au-dessus du Groenland, et la banquise de l'Antarctique Ouest, bien qu'une incertitude considérable est liée à ces événements. Mais au-delà d'une augmentation de 4°C, les forêts Amazonienne et Boréale seraient en danger, comme le serait la banquise antarctique Est, et le permafrost. Toute la circulation thermique des océans serait perturbée à cette température, y compris le Gulf Stream qui maintient l'Europe dans un climat tempéré malgré ses hautes latitudes. L'article conclut que les objectifs de Paris, bien qu'ambitieux, sont essentiels :

« Au-delà de 2°C, la trajectoire prise par l'humanité conduirait à une complète déglaciation de l'Hémisphère Nord, qui mettrait en péril la survie de toutes les villes côtières et des nations insulaires. Des pénuries alimentaires graves pourraient accompagner ces nouveaux régimes climatiques inédits, et des écosystèmes majeurs seraient poussés à l'extinction. Cependant, si l'on parvenait à rester en-deçà de l'objectif de Paris, la dynamique des grands systèmes de régulation de la biosphère pourrait rester globalement inchangée. Les impacts les plus catastrophiques et irréversibles n'auraient lieu que dans l'intervalle de 3 à 5°C. Si de telles augmentations de température devaient se produire, le monde tel que nous le connaissons serait fatalement amené à disparaître. »

Source: Schellnhuber et al, 2016.

Figure 23. Impacts globaux catastrophiques liés aux augmentations de températures : la justification des objectifs climatiques de Paris



Source: Schellnhuber et al, 2016.

Note: la barre grise verticale représente l'intervalle de températures constituant l'objectif climatique de Paris, entre 1.5°C et 2.0°C

Actions régionales, nationales et locales

Alors que les négociations internationales avançaient à pas lents pendant les décennies des années 90, 2000, et 2010, jusqu'à l'aboutissement de l'Accord de Paris en 2015, d'autres efforts ont eu lieu à des échelles régionales, nationales ou locales. On citera parmi ces efforts :

- L'Union Européenne, afin de répondre à ses obligations, prises au sein du Protocole de Kyoto, créa un système de permis à émettre qui entra en application en 2005 (voir encadré 7).
- Des systèmes d'échanges de permis à émettre furent également établis dans plusieurs régions des Etats-Unis. La "Regional Greenhouse Gas Initiative" (RGGI) créée par une coopération de 9 Etats du Nord-Est des Etats-Unis est un marché de droits à émettre qui s'applique à toutes les centrales électriques de ces 9 Etats (Connecticut, Delaware, Maine, Maryland, Massachusetts, New Hampshire, New York, Rhode Island, Vermont). La plupart des permis sont vendus aux enchères (certains sont vendus à un prix fixe) et les revenus sont utilisés pour financer des investissements dans les énergies renouvelables et des programmes d'économie d'énergie et d'efficacité énergétique. Le prix des permis a varié dans une fourchette de 2 à 5 dollars par tonne de CO₂.⁸¹ En 2013, l'Etat de Californie a établi un système de permis à émettre obligatoire. « Ce programme a imposé des

⁸¹ www.rggi.org.

plafonds d'émissions de gaz à effet de serre qui ont baissé chaque année de 2% entre 2013 et 2015 puis de 3% par an entre 2015 et 2020 ». ⁸²

ENCADRE 7: LE SYSTEME COMMUNAUTAIRE DE QUOTAS D'EMISSIONS (SCEQE) DE L'UNION EUROPEENNE

En 2005, L'Union Européenne a lancé le Système Communautaire de Quotas d'Emissions (SCEQE), qui inclut environ 11,000 centrales et usines qui collectivement émettent près de la moitié des émissions de CO₂ de l'UE. En 2012, le système s'est étendu pour inclure l'aviation, y compris pour les vols provenant de l'extérieur de l'Union Européenne. Selon le SCEQE, chaque pays développe un Plan d'Allocation National qui détermine le nombre total de permis ou quotas disponible dans ce pays, et le nombre de quotas alloués pour chaque unité de production (centrale ou usine). Les permis sont vendus aux enchères ou bien alloués à quelques entreprises gratuitement et en fonction de leurs émissions passées. Tout permis inutilisé peut être revendu sur le marché des permis à émettre. La phase initiale (2005-2007) s'est avérée décevante car trop de permis avaient été alloués, ce qui a conduit à une chute des prix des permis, de 30 Euros par tonne à moins de 1 Euro par tonne à la fin de 2007. Dans la seconde phase (2008-2012) moins de permis ont été alloués, conduisant à une relative stabilité des prix autour de 15 à 20 Euros par tonne pendant quelques années. Cependant, au milieu de l'année 2012, une surabondance de permis entraîna à nouveau une chute des prix de 5 à 10 Euros par tonne. Malgré la volatilité des prix, le SCEQE a conduit à une réduction des émissions de la part des gros émetteurs, de 8% entre 2005 et 2010. De plus, le coût de cette initiative s'est avéré beaucoup plus faible qu'escompté, environ 0,5% du PIB de l'Union Européenne.

L'Union Européenne est désormais dans la troisième phase du SCEQE, qui a débuté en 2013 et s'achèvera en 2020. Dans cette phase, tous les gaz à effet de serre sont comptabilisés ce qui accroît le nombre de permis alloués, et le plafond est décidé, non plus à l'échelle nationale mais au niveau européen. L'objectif du programme est d'obtenir une réduction des émissions de l'UE de 21% par rapport aux niveaux de 1990 en 2020, à la fin de la troisième phase, avec un objectif supplémentaire d'une réduction de 43% en 2030.

Sources: EU-ETS website (http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index_en.htm); Grubb, et al., 2009 ; Also from http://ec.europa.eu/clima/publications/index_en.htm#Ets

- Des taxes carbone ont été instituées dans plusieurs pays, y compris une taxe sur le charbon, généralisée à l'ensemble du territoire, mise en œuvre en Inde en 2010 (d'environ 1 dollar par tonne), une taxe en Afrique du Sud, sur tous les nouveaux véhicules en fonction de leurs émissions (en 2010),

⁸² <http://www.c2es.org/us-states-regions/key-legislation/california-cap-trade>

une taxe carbone sur tous les combustibles, au Costa Rica (en 1997) et des taxes carbones instituées régionalement au Canada, dans les provinces du Québec, d'Alberta, et de Colombie Britannique (voir encadré 8).

ENCADRÉ 8: L'HISTOIRE RÉUSSIE DE LA TAXE CARBONE DE LA COLOMBIE BRITANNIQUE

En 2008, la province canadienne de la Colombie Britannique, sur la côte pacifique, a institué une taxe carbone de 10 dollars canadiens par tonne de CO₂. Cette taxe s'est élevée graduellement chaque années de 5 dollars par an, jusqu'à atteindre 30 dollars en 2012. Ceci s'est traduit par un prix additionnel à la pompe de 26 cents par gallon d'essence, avec des augmentations de prix comparables pour toutes les autres sources d'énergies fossiles.

Cette taxe a été conçue pour être une taxe à revenu neutre c'est-à-dire que la province a réduit les impôts sur le revenu ainsi que les impôts sur les entreprises de la somme égale à celle reçue en taxe carbone. La Colombie Britannique a désormais le taux d'impôt sur le revenu le plus bas du Canada et un des taux d'imposition des entreprises les plus bas de tous les pays industrialisés.

Au cours des six premières années de son application, la consommation de combustibles fossiles a diminué, selon les combustibles de 5% à 15%, alors que pour le reste du Canada, elle a continué à s'accroître de 3%. Pendant la même période le PIB par habitant a augmenté en Colombie Britannique, de manière légèrement supérieure à l'augmentation pour l'ensemble du Canada. En diminuant les impôts sur les revenus et sur les entreprises, l'emploi et l'investissement ont été encouragés, tout en décourageant de plus grandes consommations de combustibles fossiles.

L'expérience de la Colombie Britannique a été donné en exemple par l'OCDE et par la Banque Mondiale, comme une réussite dont tous les pays doivent s'inspirer. D'après une étude récente, la taxe carbone a eu des effets négligeables sur l'économie, et en dépit d'une résistance initiale, elle a fini par remporter le soutien d'une large majorité de citoyens. Le gouvernement canadien a même décidé de considérer de généraliser l'expérience de cette province à l'ensemble du Canada en 2018.

Sources: The World Bank, Development in a changing climate. British Columbia's carbon tax shift: an environmental and economic success. Sept. 10, 2014; The Economist, British Columbia's carbon tax: the evidence mounts. July 31, 2014, Ministry of Finance, British Columbia, Carbon Tax: overview of the revenue-neutral carbon tax; Murray and Rivers, 2015; Metcalf, 2015; <http://www.nationalobserver.com/2016/10/03/news/breaking-feds-announce-pan-canadian-carbon-price-plan-2018>.

- Des réseaux de villes se sont organisés à travers le monde pour faire face ensemble au changement climatique et partager connaissances et pratiques. Le réseau C40 comprend 90 mégapoles qui représentent plus de 650 millions d'habitants et 25% du PIB mondial, dont l'objectif est de mesurer et de réduire l'ensemble des émissions urbaines. Un autre réseau, le "compact of mayors" une coalition de maires de plus de 500 villes, a été créé en 2014 avec les mêmes objectifs.⁸³ En 2050, entre 65 et 75% de la population mondiale vivra en ville, et plus de 40 millions de personnes par an émigreront vers les villes. La population urbaine grossira approximativement de 3,5 milliards à l'heure actuelle, à 6,5 milliards en 2050. D'après les estimations, les villes seraient aujourd'hui responsables de 75% des émissions globales de CO₂, avec parmi les plus gros contributeurs les transports et l'immobilier (logements, bureaux et entreprises).⁸⁴
- Suite à la sortie des Etats-Unis de l'Accord de Paris, décidée par l'Administration Trump, une coalition d'Etats a formé l'Alliance Climatique des Etats-Unis (United States Climate Alliance), s'engageant à redoubler d'efforts dans ses actions pour réduire ses émissions, afin de compenser l'absence de politique fédérale, cherchant à atteindre les objectifs de Paris et à les dépasser. En novembre 2017, cette Alliance comptait les Etats suivants : Californie, Caroline du Nord, Colorado, Connecticut, Delaware, Hawaii, Massachusetts, Minnesota, New York, Oregon, Rhode Island, Vermont, Virginie, Washington, ainsi que le territoire de Porto Rico.⁸⁵

Des forêts et des sols comme solutions à la crise climatique

Bien que l'attention des politiques climatiques ait été presque entièrement focalisée sur la nécessité de réduire les émissions en provenance des combustibles fossiles, un autre aspect important de la lutte contre le changement climatique réside dans le rôle joué par les forêts et par les sols. A l'heure actuelle, environ 11% des émissions de gaz à effet de serre proviennent de la déforestation et des modifications dans l'usage des terres, en particulier la perte des forêts tropicales.⁸⁶ Les négociations internationales ont abouti à l'adoption d'un programme appelé **REDD (Reduction of Emissions from Deforestation and Degradation)**. L'accord de Copenhague (2009) a pris en considération la nécessité de réduire les émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts, et a établi un mécanisme appelé REDD-plus. L'accord a insisté sur le financement de ces mesures par les pays riches en direction des pays en développement, afin de les aider dans leurs actions de mitigation, ainsi que d'adaptation, notamment au travers du financement de REDD-plus, de développement de technologies et de transfert de connaissances et

⁸³ <http://www.c40.org/>; <https://www.compactofmayors.org/>

⁸⁴ <http://www.theguardian.com/cities/2015/nov/17/cities-climate-change-problems-solution>;
http://www.unep.org/urban_environment/issues/climate_change.asp

⁸⁵ Voir le site de la U.S. Climate Alliance : <https://www.usclimatealliance.org/>

⁸⁶ IPCC, 2014b, *Summary for Policymakers*, p. 5; Harris and Feriz, 2011; Sanchez and Stern, 2016.

de capacités d'action. Cependant comme nous l'avons évoqué plus haut, la mise en œuvre des mesures REDD a souvent eu des effets pervers dans les pays pauvres, conduisant à l'éviction des petits paysans et des peuples autochtones de leurs terres ancestrales. Il est donc nécessaire à l'avenir que ces programmes incluent des règles éthiques strictes empêchent de tels abus des droits humains et protègent les populations rurales les plus vulnérables.

Outre leur rôle dans la réduction des émissions, les forêts et les sols ont le potentiel énorme d'absorber et de stocker du carbone. L'ensemble des sols de la Terre contient 2500 milliards de tonnes de carbone — plus que l'ensemble du carbone présent dans l'atmosphère (840 milliards de tonnes) et dans la biomasse des plantes (560 milliards de tonnes) ensemble. Mais on estime que les sols ont perdu entre 50 et 70 pourcents de leur carbone naturel initial au cours du siècle dernier. Globalement, ces sols dégradés pourraient réabsorber 80 à 100 milliards de tonnes métriques de carbone par an au travers de méthodes d'agriculture régénérative comprenant la polyculture, l'alternance de cultures permettant aux sols de ne jamais être dénudés, l'agro-forestrie, le recyclage des nutriments, la rotation des cultures, des modes appropriés de gestion des pâturages, et l'application de compost ou de biochar sur les sols, selon les principes de l'agriculture biologique.⁸⁷ Il est probable que ce vaste potentiel de stockage du carbone sera un des aspects majeurs des négociations futures sur le climat⁸⁸ — un facteur crucial dans les efforts nécessaires afin que la trajectoire actuelle des contributions promises à Paris (voir figure 22) se rapproche le plus possible du chemin que l'on doit prendre afin de maintenir l'augmentation des températures en-deçà de 2°C.

⁸⁷ Lal, 2010; Chris Mooney, "The Solution to Climate Change that has nothing to do with cars or coal", *Washington Post*, February 11, 2016; Beth Gardiner, "A boon for soils, and for the environment", *New York Times*, May 17, 2016; Center for Food Safety, "Soil & Carbon: Soil solutions to Climate problems", 2015.

⁸⁸ Pour une analyse plus détaillée, voir le Climate Policy brief #4, du GDAE "Hope below our feet: Soil as a Climate Solution." <http://www.ase.tufts.edu/gdae/Pubs/climate/ClimatePolicyBrief4.pdf>.

CONCLUSION

Le changement climatique est un défi qui incorpore des questions d'externalités, de gestion des ressources en bien communs et des ressources renouvelables et non-renouvelables, et de l'actualisation des coûts et bénéfices au cours du temps. Il a des dimensions économiques, scientifiques, politiques et technologiques. L'analyse économique seule ne peut pas répondre de manière adéquate à un problème de cette ampleur mais la théorie économique et les politiques économiques ont beaucoup à offrir dans la recherche de solutions.

Une réponse effective au problème du changement climatique demande au niveau mondial une action beaucoup plus ambitieuse que tout ce qui a été jusqu'à présent tenté. Les instruments de la politique économique ont le pouvoir d'altérer les modes d'utilisation de l'énergie, du développement industriel, et de la distribution des revenus, qui sont des aspects essentiels de n'importe quel programme de mitigation ou d'adaptation au changement climatique. Les preuves des impacts du changement climatique sont déjà très claires et le problème deviendra de plus en plus urgent au fur et à mesure que l'accumulation toujours plus grande de gaz à effet de serre dans l'atmosphère continuera et que les dommages qui en résulteront seront de plus en plus graves, entraînant l'élévation des coûts de l'adaptation à cette nouvelle réalité (voir Encadré 9).

ENCADRÉ 9. POUR LES VILLES CÔTIÈRES AMÉRICAINES, L'ADAPTATION CLIMATIQUE DEVIENT URGENTE

En Août 2016, des orages torrentiels le long des côtes du Golfe du Mexique ont causé des inondations catastrophiques dans le Sud de la Louisiane. Avec 9 milliards de dollars de dommages, cette catastrophe naturelle a été qualifiée d'épisode le pire vécu par les Etats-Unis depuis l'Ouragan Sandy en 2012. De pires catastrophes ont eu lieu depuis, avec la série noire des trois ouragans de Harvey, Irma et Maria, ayant dévasté le Texas, la Floride, et Porto Rico, en Septembre 2017.

L'Administration Nationale des Océans et de l'Atmosphère (NOAA) estime que le réchauffement climatique a accru les risques de pluies intenses par 40% en raison de la plus grande humidité dans une atmosphère plus chaude.

Déjà, les villes côtières des Etats-Unis sont en train d'investir massivement pour se préparer aux futures inondations. En Floride, la ville de Fort Lauderdale dépense des millions de dollars pour réparer les routes ainsi que les systèmes de drainage, endommagés par les inondations causées par les grandes marées. Miami Beach a accru ses impôts locaux afin de financer un programme de 400 millions de dollars consistant à relever le niveau des rues, installer des pompes et élever la hauteur des digues et murs de protection du littoral. Pour une ville de taille moyenne comme Norfolk, Virginie, le coût total d'adaptation à la montée du niveau de l'océan a été estimé à 1,2 milliards de dollars, soit environ 5000 dollars pour chaque résident. Ces coûts, estimés à l'échelle de villes particulières, font présager d'un ordre de grandeur de plusieurs trillions de dollars pour l'ensemble de la Côte Est et du Golfe du Mexique. On estime que 1,9 millions de résidences en bord de mer seront perdues d'ici 2100 en raison de la montée du niveau des océans, ce qui représente une perte de 882 milliards de dollars.

Selon certains analystes économistes, la possibilité d'un effondrement du marché immobilier de tous les biens du littoral pourrait provoquer une crise boursière aussi importante que celles du crash de la bulle des dot-com en 2000 et du crash des « sub-primes » en 2008. Le Pentagone n'est pas non plus à l'abri, car la plupart des bases navales et les terres sur lesquelles elles sont installées devront faire face à la montée du niveau des océans et s'y adapter.

Sources: Jonah Engel Bromwich, "Flooding in the South looks a lot like climate change" New York Times, August 16, 2016; Henry Fountain, "Scientists see push from climate change in Louisiana flooding" New York Times September 7, 2016; Justin Willis, "Flooding of coast, caused by global warming, has already begun" New York Times, September 3, 2016; Ian Urbina, "Perils of climate change could swamp coastal real estate," New York Times, November 24, 2016

CONCEPTS ET MOTS-CLES

acidification des océans : augmentation de l'acidité de l'eau dans les océans, résultant de la dissolution du carbone provenant du CO₂ émis dans l'atmosphère.

analyse coûts-bénéfices : un outil de l'analyse économique et politique qui tente de donner une valeur monétaire à tous les coûts et les bénéfices d'une action, afin d'en déterminer les bénéfices nets.

analyse coût-efficacité : un outil économique et politique qui détermine l'approche la moins coûteuse pour atteindre un objectif donné.

Backstop : technologies énergétiques telles que le solaire et l'éolien qui peuvent remplacer des sources d'énergie actuelles, en particulier les combustibles fossiles.

bénéfice net marginal : le bénéfice net de la consommation ou de la production d'une unité additionnelle de ressource ; est égal au bénéfice marginal moins le coût marginal.

Bien communs mondiaux : ressources collectives mondiales telles que l'atmosphère ou les océans.

biens publics : biens qui sont disponibles à tous (clause de non-exclusivité), dont l'utilisation par une personne ne réduit pas leur disponibilité par d'autres (clause de non-compétition d'usage).

budget carbone global : budget maximal de carbone exprimé en total cumulatif d'émissions qui peuvent être relâchées dans l'atmosphère dans la limite connue en l'état actuel de la science permettant d'échapper aux pires conséquences du changement climatique.

business-as-usual : scénario où les comportements continuent de la même manière que précédemment sans qu'il y ait aucun changement significatif, politique, technologique et autre, pour les modifier.

changement climatique mondial : tous les changements du climat mondial, y compris des températures, des précipitations, de la fréquence et de l'intensité des orages, etc. qui résultent des changements de concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

contributions déterminées au niveau national (CDN) : contributions à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, volontairement consenties par chacune des nations présentes dans la négociation climatique à la 21^{ème} Conférence de Parties (COP21) à Paris en 2015. En anglais NDC, Nationally Determined Contributions.

coûts évités : coûts qui peuvent être évités grâce à la préservation de l'environnement en l'état actuel.

coûts Marginaux de Réduction des émissions : coûts de réduction d'une unité supplémentaire de carbone non-émis.

coût social du carbone : estimation du coût financier des émissions de carbone, incluant les coûts présents et à venir.

effet de serre : l'effet de certains gaz dans l'atmosphère terrestre, qui emprisonne la radiation solaire, et résulte en un accroissement des températures mondiales et en d'autres changements du climat mondial.

élasticité de la demande : la sensibilité au prix de la quantité demandée d'un bien sur le marché.

empreinte carbone : le total des émissions de carbone, directes et indirectes, résultant de la consommation d'un individu, d'une institution, ou d'une nation.

équivalent CO₂ (ou CO_{2e}) : mesure de l'ensemble des émissions de tous les gaz à effet de serre ou de leurs concentrations, en convertissant toutes les émissions ou concentrations des gaz autres que CO₂ dans leurs équivalents en CO₂ en prenant en compte leurs impacts différents en terme de réchauffement.

externalité : l'effet d'une transaction marchande sur des individus ou entreprises autres que ceux directement impliqués dans la transaction.

feedback (effet rétroactif) : processus de changement dans un système qui est généré en réponse à une modification et qui vient soit contrecarrer soit renforcer cette modification initiale.

gaz à effet de serre : gaz tels que le dioxyde de carbone et le méthane dont les concentrations atmosphériques influencent le climat mondial en emprisonnant la radiation solaire dans l'atmosphère.

groupe d'Experts Intergouvernemental sur le Climat (GIEC) : en Anglais « Intergovernmental Panel on Climate Change » (IPCC); Groupe international de scientifiques et d'experts qui travaillent sous les auspices des Nations Unies. Ce groupe a été créé en 1988 à la demande des Etats-Nations en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions, et les stratégies pour éviter leurs conséquences les plus graves.

intensité en gaz à effet de serre : quantité d'émissions de gaz à effet de serre par unité de produit économique.

justice climatique : le partage équitable des dommages causés par le changement climatique et des coûts des mesures politiques.

mécanisme de développement propre : une clause du Protocole de Kyoto qui permet aux pays industriels de recevoir des crédits pour l'aide aux pays en développement visant à réduire leurs émissions de CO₂.

mesures adaptatives: politiques qui proposent des solutions d'adaptation aux effets écologiques adverses du changement climatique.

mesures préventives (ou de Mitigation) : politiques qui ont pour objet de prévenir les impacts écologiques adverses.

mise en œuvre conjointe : mécanisme proposé par le Protocole de Kyoto et qui permet aux nations industrialisées d'obtenir des crédits pour le financement de projets de réduction d'émissions dans d'autres pays industrialisés.

options à moindre coût : actions qui peuvent être prises au coût le plus faible parmi tous les coûts de toutes les autres options

permis transférables (et échangeables) : permis qui donnent l'autorisation d'émettre une certaine quantité de polluant et qui peuvent être échangés (achetés et vendus) sur le marché, entre Etats et entreprises.

polluants-stock : un polluant qui s'accumule dans l'environnement, tel que le dioxyde de carbone et les chlorofluorocarbures (CFCs).

principe de précaution : ce principe énonce que les politiques devraient faire en sorte d'éviter des conséquences qui sont dommageables pour la santé ou pour l'environnement, même si ces conséquences ne peuvent pas être prédites avec certitudes, et surtout quand elles peuvent être potentiellement catastrophiques ou irréversibles.

puits de carbone : parties de l'écosystème qui ont la capacité d'absorber certaines quantités de dioxyde de carbone, telles que les forêts, les sols et les océans.

réchauffement climatique : l'augmentation des températures globales moyennes résultant des émissions de gaz à effet de serre produites par les activités humaines.

REDD : "Reduction of Emissions from deforestation and degradation" – Réduction des émissions provenant de l'action contre la déforestation et la dégradation. Programme des Nations-Unies adopté dans le cadres du protocole de Kyoto et visant à réduire les émissions provenant de la déforestation et de la dégradation des zones forestières.

ressources communes (ou collectives) ou biens communs : ressources qui ne peuvent pas faire l'objet d'une appropriation privée ; ces ressources peuvent être d'échelle locale comme les parcs publics ou d'échelle mondiale comme les océans ou la capacité de la Terre et de son atmosphère à absorber le carbone.

stabilisation climatique : politiques de réduction de l'utilisation des combustibles fossiles qui permettrait de stabiliser l'impact du changement climatique, et de mettre un arrêt à son potentiel d'accroissement.

système de plafonnement des permis à émettre : système d'échange et de transfert de permis à émettre des gaz à effet de serre

taux d'actualisation : le taux annuel permettant d'évaluer des bénéfices ou coûts futurs en valeur actuelle afin de les comparer aux coûts et bénéfices d'aujourd'hui. \

taxe carbone : une taxe par unité de biens et services, basée sur la quantité de dioxyde de carbone émise durant la production ou la consommation de ce bien ou service.

taxe pollueur-payeur : taxe par unité de produit, basée sur la quantité de pollution associée à la production d'un bien ou service.

taxe progressive : taxe pour laquelle le taux de taxation, en pourcentage du revenu, s'accroît avec le revenu, de sorte que les personnes et entreprises avec les plus hauts revenus payent une part plus importante de leurs revenus en impôts.

taxe régressive : taxe pour laquelle le taux de taxation, en pourcentage du revenu, décroît avec le revenu.

taxe à revenu neutre : Taxe pour laquelle un transfert existe, qui vient compenser pour les contribuables ce qu'ils ont versé pour cette taxe (voir transfert de taxe à revenu neutre).

transfert de taxe à revenu neutre : politiques fiscales visant à équilibrer l'augmentation des impôts sur certains produits par une réduction d'autres impôts, telles qu'une réduction de l'impôt sur le revenu pour compenser la charge de la taxe carbone.

transfert de technologie : le processus de partage de l'information et de l'équipement technologique, en particulier entre nations.

volatilité des prix : changements rapides et fréquents des prix, conduisant à une instabilité des marchés.

REFERENCES

- Ackerman, Frank, and Elizabeth A. Stanton. 2008. "The Cost of Climate Change." Natural Resource Defense Council. www.nrdc.org/globalwarming/cost/cost.pdf.
- . 2011. "Climate Economics: The State of the Art." Stockholm Environment Institute—U.S. Center. http://sei-us.org/Publications_PDF/SEI-ClimateEconomics-state-of-art-2011.pdf.
- Ackerman, Frank, Elizabeth A. Stanton, and Ramón Bueno. 2013. "CRED: A New Model of Climate and Development." *Ecological Economics*, 85: 166–176.
- African Development Bank, Asian Development Bank, Department for International Development (UK), Directorate-General for Development (European Commission), Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (Germany, Ministry of Foreign Affairs), Development Cooperation (The Netherlands), Organization for Economic Cooperation and Development, United Nations Development Programme, United Nations Environment Programme, and World Bank, 2003. *Poverty and Climate Change: Reducing the Vulnerability of the Poor Through Adaptation*. www.unpei.org/PDF/Poverty-and-Climate-Change.pdf.
- American Geophysical Union. 2014. Human-Induced Climate Change Requires Urgent Action. www.agu.org.
- Barnes, Peter, Robert Costanza, Paul Hawken, David Orr, Elinor Ostrom, Alvaro Umana, and Oran Young. 2008. "Creating an Earth Atmospheric Trust." *Science* 319:724.
- Boden, T.A., G. Marland, and R.J. Andres. 2016. "Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions." Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory. http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2013.ems.
- Burke, M., S. Hsiang, and E. Miguel. 2015. "Global Nonlinear Effect of Temperature on Economic Production." *Nature*, 527: 235–239.
- Carl, Jeremy, and David Fedor. 2016. "Tracking Global Carbon Revenues: A Survey of Carbon Taxes versus Cap-and-trade in the Real World." *Energy Policy* 96: 50-77.
- Clark, Duncan. 2012. "Has the Kyoto Protocol made any difference to carbon emissions?" *The Guardian*, November 26. <https://www.theguardian.com/environment/blog/2012/nov/26/kyoto-protocol-carbon-emissions>
- Climate Equity Reference Project. 2015. Fair Shares: A Civil Society Review of NDCs." http://civilsocietyreview.org/wp-content/uploads/2015/11/CSO_FullReport.pdf
- Cline, William R. 2007. *Global Warming and Agriculture: Impact Estimates by Country*. Washington, D.C.: Center for Global Development and Petersen Institute for International Economics. <http://www.cgdev.org/content/publications/detail/14090>.
- Cook J., et al. 2016. "Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming." *Environmental Research Letters* Vol. 11 No. 4, (13 April). DOI:10.1088/1748-9326/11/4/048002.

- DeConto, R., and D. Pollard. 2016. "Contribution of Antarctica to Past and Future Sea-level Rise." *Nature*, 531: 591–597.
- Dietz, Simon, and Nicholas Stern. 2014. "Endogenous Growth, Convexity of Damages and Climate Risk: How Nordhaus' Framework Supports Deep Cuts in Carbon Emissions." Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, Working paper No. 159, June.
- Fankhauser, Samuel. 1995. *Valuing Climate Change: The Economics of the Greenhouse*. London: Earthscan.
- Goodwin, Phil, Joyce Dargay, and Mark Hanly. 2004. "Elasticities of Road Traffic and Fuel Consumption with Respect to Price and Income: A Review." *Transport Reviews* 24(3): 275–292.
- Grubb, Michael, Thomas L. Brewer, Misato Sato, Robert Heilmayr, and Dora Fazekas. 2009. "Climate Policy and Industrial Competitiveness: Ten Insights from Europe on the EU Emissions Trading System." German Marshall Fund of the United States, Climate & Energy Paper Series 09.
- GIZ. 2013. "International Fuel Prices 2012/2013," 8th ed., on behalf of Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (Germany).
- Hansen, et al. 2008. "Target Atmospheric CO₂: Where should Humanity Aim?" *Open Atmospheric Science Journal*, 2: 217–231.
- Harris, Jonathan M., and Maliheh Birjandi Feriz, 2011. *Forests, Agriculture, and Climate: Economics and Policy Issues*. Tufts University Global Development and Environment Institute, http://www.ase.tufts.edu/gdae/education_materials/modules.html#REDD
- Heal, Geoffrey and Anthony Millner. 2014. "Uncertainty and Decision-Making in Climate Change Economics." *Review of Environmental Economics and Policy* 8.1: 120-137.
- Hönisch, Bärbel, et al. 2012. "The Geological Record of Ocean Acidification." *Science*, 335(6072): 1058–1063.
- Hughes, Jonathan E., Christopher R. Knittel, and Daniel Sperling. 2008. "Evidence of a Shift in the Short-Run Price Elasticity of Gasoline Demand." *Energy Journal* 29 (1), 113–134.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007a. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press.
- . 2007b. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press.
- . 2007c. *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change*. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014a. *Climate Change 2013, The Physical Science Basis*. <http://ipcc.ch/>.
- . 2014b. *Climate Change 2014 Synthesis Report*. <http://ipcc.ch/>.
- . 2014c. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*.

- . 2014d. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*.
- Jevrejeva, S., J.C. Moore, and A. Grinsted, 2012. "Sea Level Projections to AD2500 with a New Generation of Climate Change Scenarios." *Journal of Global and Planetary Change*, 80/81: 14–20.
- Kahn, Matthew E. 2016. "The Climate Change Adaptation Literature." *Review of Environmental Economics and Policy* **10.1**: 166–178.
- Kahsay, Goytom Abraha and Lars Gårn Hansen. 2016. "The Effect of Climate Change and Adaptation Policy on Agricultural Production in Eastern Africa." *Ecological Economics* **121**: 54–64.
- Kesicki, Fabian, and Paul Ekins. 2011. "Marginal Abatement Cost Curves: A Call for Caution." *Climate Policy* 12(2): 219–236.
- Komanoff, Charles. 2014. "Is the Rift between Nordhaus and Stern Evaporating with Rising Temperatures?" Carbon Tax Center, August 21.
<http://www.carbontax.org/blog/2014/08/21/is-the-rift-between-nordhaus-and-stern-evaporating-with-rising-temperatures/>.
- Lal, Rattan. 2010. "Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security." *Bioscience* **60.9**: 708–21. Oxford Journals.
- McKinsey & Company. 2007. "A Cost Curve for Greenhouse Gas Reduction." The McKinsey Quarterly 1: 35–45,
http://www.epa.gov/air/caaac/coaltech/2007_05_mckinsey.pdf.
- . 2009. *Pathways to a Low-Carbon Economy*.
<http://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability-and-resource-productivity/our-insights/pathways-to-a-low-carbon-economy>.
- . 2013. *Pathways to a Low-Carbon Economy, Version 2*
<http://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability-and-resource-productivity/our-insights/pathways-to-a-low-carbon-economy>.
- Metcalf, Gilbert E. 2007. "A Proposal for a U.S. Carbon Tax Swap." Washington, DC: Brookings Institution. Discussion Paper 2007–12.
- . 2015. "A Conceptual Framework for Measuring the Effectiveness of Green Tax Reforms." Green Growth Knowledge Platform Third Annual Conference on "Fiscal Policies and the Green Economy Transition: Generating Knowledge – Creating Impact". Venice, Italy, January 29–30.
- Millar, Richard, Myles Allen, Joeri Rogelj, and Pierre Friedlingstein. 2016. "The Cumulative Carbon Budget and its Implications." *Oxford Review of Economic Policy* **32(2)**: 323–342.
- Murray, Brian, and Nicholas Rivers. 2015. "British Columbia's Revenue-neutral Carbon Tax: A Review of the Latest "Grand Experiment" in Environmental Policy. *Energy Policy* **86**: 674–683.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2010. "Ocean Acidification, Today and in the Future." www.climatewatch.noaa.gov/image/2010/ocean-acidification-today-and-in-the-future/.

- . 2012. "Global Climate Change Indicators." www.ncdc.noaa.gov/indicators/index.html.
- . 2012. *State of the Climate, Global Analysis Annual 2012*. National Climatic Data Center. www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/.
- Nordhaus, William. 2007. "The Stern Review on the Economics of Climate Change." http://nordhaus.econ.yale.edu/stern_050307.pdf.
- . 2008. *A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies*. New Haven: Yale University Press.
- . 2013. *The Climate Casino*. New Haven; London: Yale University Press.
- Nordhaus, William D., and Joseph Boyer. 2000. *Warming the World: Economic Models of Global Warming*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Olivier, Jos G.J., Greet Janssens-Maenhout, Marilena Muntean, and Jeroen A.H.W. Peters. European Commission's Joint Research Centre, 2014. "Trends in Global CO2 Emissions: 2014 Report," http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news_docs/jrc-2014-trends-in-global-co2-emissions-2014-report-93171.pdf.
- Parry, Martin, Nigel Arnell, Pam Berry, David Dodman, Samuel Fankhauser, Chris Hope, Sari Kovats, Robert Nicholls, David Satterthwaite, Richard Tiffin, and Tim Wheeler. 2009. "Assessing the Costs of Adaptation to Climate Change: A Review of the UNFCCC and Other Recent Estimates." Report by the Grantham Institute for Climate Change and the International Institute for Environment and Development. London.
- Revesz R., K. Arrow *et al.* 2014. "Global Warming: Improve Economic Models of Climate Change." *Nature*, April 4. <http://www.nature.com/news/global-warming-improve-economic-models-of-climate-change-1.14991>.
- Rosen, Richard A. and Edeltraud Guenther. 2014. "The Economics of Mitigating Climate Change: What Can We Know?" *Challenge* **57.4**: 57-81.
- Sanchez, Luis F. and David I. Stern. 2016. "Drivers of Industrial and Non-industrial Greenhouse Gas Emissions." *Ecological Economics* **124**: 17-24.
- Schellnhuber, Hans Joachim, Stefan Rahmstorf, and Ricarda Winkelmann. 2016. "Why the Right Climate Target was Agreed in Paris." *Nature Climate Change* **6**: 649-653.
- Stanton, Elizabeth A. 2012. "Development Without Carbon: Climate and the Global Economy Through the 21st Century." Stockholm Environment Institute–U.S. Center. http://sei-us.org/Publications_PDF/SEI-Development-Without-Carbon-Ph1.pdf.
- Stern, Nicholas. 2007. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press. www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/sternreview_index.cfm.
- . 2009. *The Global Deal: Climate Change and the Creation of a New Era of Progress and Prosperity*. Philadelphia: Perseus Books Group.

- United Nations Environmental Programme (UNEP). 2016. *The Adaptation Gap Report*. Nairobi, Kenya: UNEP. <http://drustage.unep.org/adaptationgapreport/2016>.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 2007. "Investment and Financial Flows to Address Climate Change." Climate Change Secretariat, Bonn.
- U.S. Energy Information Administration (EIA). 2016. *International Energy Outlook*. <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/emissions.cfm334>
- United States Global Change Research Program. 2009. *Second National Climate Assessment*. <http://globalchange.gov/publications/reports/scientific-assessments/us-impacts>.
- . 2014. *Third National Climate Assessment*, (May) Overview and Report Findings.
- Vale, Petterson Molina. 2016. "The Changing Climate of Climate Economics." *Ecological Economics* **121**: 12-19.
- Watts, Nick et al. 2017. "The *Lancet* Countdown on health and climate change: from 25 years of inaction to a global transformation for public health", *The Lancet*, October 30, 2017.
- Weitzman, Martin. 2009. "On Modeling and Interpreting the Economics of Catastrophic Climate Change." *Review of Economics and Statistics*, 91(1): 1–19.
- World Bank. 2010. *World Development Report 2010: Development and Climate Change*. Washington, DC.
- . 2010. "The Costs to Developing Countries of Adapting to Climate Change: New Methods and Estimates." Consultation Draft.
- World Health Organization. 2009. "Protecting Health from Climate Change: Connecting Science, Policy, and People."
- Zhou, P. and M. Wang. 2016. "Carbon Dioxide Emissions Allocation: A Review." *Ecological Economics* **125**: 47-59.

QUESTIONS

1. Quelles sont les preuves principales de l'existence du changement climatique ? Quelles en sont les causes principales ? Discutez de l'urgence de la question. Quels sont les problèmes en termes d'équité et de responsabilité soulevés par le changement climatique et comment peut-on y répondre ?
2. Considérez-vous que l'analyse coûts-bénéfices constitue un moyen utile pour répondre au problème du changement climatique ? Comment peut-on effectuer une évaluation adéquate de choses telles que la fonte de la calotte glaciaire de l'Arctique et l'inondation des nations insulaires ? Quels sont la place et le rôle appropriés de l'analyse économique lorsque l'on considère des questions qui affectent les écosystèmes mondiaux et les générations futures ?
3. Quels objectifs seraient les plus appropriés dans la réponse à apporter au changement climatique ? Puisqu'il est impossible d'arrêter entièrement le changement climatique, comment doit-on équilibrer les efforts entre l'adaptation et la prévention/mitigation ?
4. Quelle politique économique climatique préférez-vous : une taxe carbone ou un système de plafonnements de permis à transférer ? Pourquoi ? Quels sont les principaux obstacles à la mise en œuvre de politiques efficaces ?
5. Les politiques climatiques peuvent se focaliser sur le changement des comportements ou sur le changement des technologies. Quelles approches vous paraissent les plus efficaces ? Quelles politiques pourraient entraîner des changements à la fois comportementaux et technologiques ?
6. Le processus de formulation et de mise en œuvre des Accords internationaux sur le climat a été long et tortueux, semé de discordes et d'impasses. Quelles sont les raisons principales expliquant la difficulté à se mettre d'accord sur des actions spécifiques ? D'un point de vue économique, quelles sortes d'incitation pourraient s'avérer utiles pour convaincre les pays à entrer dans un accord et à l'appliquer ? Quelles sortes de politiques "gagnant-gagnant" pourrait-on proposer pour dépasser les obstacles de la négociation ?

EXERCICES

- On suppose que selon les termes d'un accord international, les émissions de CO₂ des Etats-Unis doivent être réduites de 200 millions de tonnes et que celles du Brésil doivent l'être de 50 millions de tonnes. Voici les options dont les Etats-Unis et le Brésil disposent pour réduire leurs émissions :

Etats-Unis :

Options politiques	Réduction totale des émissions (en million de tonnes de carbone)	Coût (en milliards de \$)
A : remplacer les infrastructures pour qu'elles soient plus efficaces en consommation d'énergie	60	12
B : Reforestation	40	20
C : Remplacement des centrales thermiques à charbon	120	30

Brésil :

Options politiques	Réduction totale des émissions (en million de tonnes de carbone)	Coût (en milliards de \$)
A : remplacer les infrastructures pour qu'elles soient plus efficaces en consommation d'énergie	50	20
B : Reforestation	30	3
C : Remplacement des centrales thermiques à charbon	40	8

- Quelles politiques sont les plus efficaces pour que chaque nation puisse atteindre leur objectif de réduction? De combien les deux nations peuvent-elles réduire leurs émissions en utilisant chaque option, et à quel coût, si les deux pays opèrent indépendamment l'un de l'autre ? Supposons que l'on puisse appliquer chaque option à un coût marginal constant. Par exemple, les Etats-Unis pourraient choisir de réduire les émissions par un changement d'infrastructures plus efficaces (option 1) – cette réduction s'élevant à 10 millions de tonnes pour un coût de 2 milliards de dollars. (indice : commencez par calculer le coût moyen de réduction en dollars par tonne pour chacune des six options).

- b. Supposons qu'il existe un marché de transactions de permis transférables permettant aux Etats-Unis et au Brésil d'échanger des permis à émettre du CO₂. Lequel des deux pays a intérêt à acheter des permis? Et lequel a intérêt à en vendre? Quel accord peut être signé entre les Etats-Unis et le Brésil pour qu'ils puissent tous les deux atteindre l'objectif de réduction de 250 millions de tonnes au moindre coût ? Pouvez-vous estimer le prix auquel s'échangera sur le marché un permis à émettre une tonne de CO₂ ? (indice : utilisez les calculs du coût moyen que vous avez effectué pour la première partie de la question).
2. Supposons que la consommation annuelle d'un ménage est de 5000 litres de pétrole ou d'essence et de 2 Mm³ (milliers de mètres cube) de gaz naturel. En utilisant les données du Tableau 5 sur les effets d'une taxe carbone, calculez combien ce ménage paierait par an avec une taxe supplémentaire de 10 dollars par tonne de carbone. On suppose que cette taxe relativement faible ne provoque pas initialement de réduction de la demande pour le pétrole et le gaz. S'il y a 20 millions de ménages dans le pays, quel serait le revenu pour le gouvernement de cette taxe carbone ?
3. Supposons maintenant que la taxe carbone s'élève jusqu'à 200 dollars par tonne de carbone. Si l'on considère la relation entre accroissement des prix et baisse de la consommation, une hypothèse raisonnable pourrait être que l'élasticité de la demande au prix provoque une baisse de 20% des quantités consommées de pétrole et de gaz. Quel serait l'impact sur une famille moyenne ? Quels seraient les revenus de la taxe pour le gouvernement ? Comment le gouvernement peut-il utiliser de tels revenus ? Quelles sont les différences entre effets de court terme et effets de long terme ?

SITES WEB

1. <http://www.ipcc.ch/> Le site web pour le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, une agence promue par les Nations-Unies pour "analyser les informations scientifiques, techniques et socio-économiques pertinentes pour la compréhension des risques de changement climatique causées par les activités humaines". Leur site comprend des rapports faisant le bilan détaillé des relations entre les activités humaines et l'évolution du climat.
2. <http://unfccc.int/2860.php/> Page d'accueil de la Convention-cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques. Le site fournit des données sur les questions relatives au changement climatique et des informations sur les processus de négociations en cours sur les accords internationaux concernant le changement climatique.
3. <http://epa.gov/climatechange/index.html> La page sur le réchauffement climatique du site web de l'agence de Protection de l'Environnement des Etats-Unis (U.S. Environmental Protection Agency). Le site fournissait jusqu'au début 2017 des liens vers une information abondante sur les causes, l'impact et les tendances et projections liées au changement climatique mondial. Note : le gouvernement actuel des Etats-Unis a restructuré l'EPA de sorte que cette Agence ne promeuve plus la lutte contre le changement climatique. Il est probable que certaines pages de son site web disparaissent dans les mois qui viennent.
4. <http://www.wri.org/our-work/topics/climate/> La page sur le climat et l'atmosphère du site web du World Resource Institute. Le site comprend plusieurs articles et des études de cas, notamment les présentations de recherche sur les mécanismes de développement propre.
5. http://rff.org/focus_areas/Pages/Energy_and_Climate.aspx et www.rff.org/research/topics/climate-change/ Ces liens web sont soutenu par l'organisation « Resources for the Future » et sont dédiés aux questions relatives au changement climatique.
6. www.hm-treasury.gov.uk/sternreview_index.htm/ Site web de l'Administration du Trésor du Royaume-Uni, qui contient la Stern Review, et qui fournit une analyse extensive de l'économie du changement climatique, comprenant tous ces aspects : impacts, stabilisation, mitigation et prévention, adaptation.